

TOP SECRET  
Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2  
SIGNATURE RECORD AND COVER SHEET

DOCUMENT DESCRIPTION

DECLASSIFY

25X1

25X1


NOTICE OF DETACHMENT

WHEN THIS FORM IS DETACHED FROM TOP SECRET MATERIAL IT WILL BE COMPLETED IN THE APPROPRIATE SPACES BELOW AND TRANSMITTED TO CENTRAL TOP SECRET CONTROL FOR RECORD.

The Top Secret material detached from this form was:

DOWNGRADED

DESTROYED

DISPATCHED (OUTSIDE CIA) TO: \_\_\_\_\_

BY: \_\_\_\_\_ (SIGNATURE)

(OFFICE) \_\_\_\_\_ (DATE) \_\_\_\_\_

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2  
TOP SECRET

25X1

25X1

25X1

Subject: BREITBAND KABEL (COAXIAL CABLES)

25X1

2. GENERAL DESCRIPTION OF GERMAN COAXIAL CABLES: There were several types of coaxial cables in use in Germany before and during the war, all of which allowed the transmission of 200 individual telephone conversations simultaneously. Each conversation was conducted on a frequency, which was separated from the other by 3 kilocycles per second.

Every type of cable had a solid copper core with a diameter of 5 mm. The outer casings were either made from copper bands with an inner diameter of 18 mm. or from aluminium bands with a minimum inner diameter of 19 mm.

For the insulation different methods were used. Cables produced by SIEMENS had Styroflex-coils and Styroflex-foils, whereas cables produced by the AEG had insulating disks.

The impedance (Wellenwiderstand) of all cables was between 60 and 73 Ohm with an attenuation of about 0.16 Neper/Km. at 1 MHz (1000 kilocycles per second). For other frequencies the attenuation is in proportion to the square root of the frequency. The transmission speed was about 275 000 km. per second.

Cables in operation in Germany before the war were used for telephone communications at a frequency band between 90 and 690 kHz and for the transmission of television on a frequency band between 1 and 4 MHz. Every 35 km. hand operated booster stations were necessary, interspaced half-way with small unmanned automatic booster stations. Both telephone and television frequencies were amplified at the main stations with the frequency used for television again amplified at the intermittent booster stations. At no times were these cables used



TOP SECRET

- 2 -

simultaneously for the transmission of telephone communications and television programmes.

3. CABLES IN USE IN GERMANY BEFORE THE WAR: The only cable used before the war was the one from BERLIN to LEIPZIG with a branch-line to the BROCKEN mountain in the HARZ. Several other lines were in the course of construction between BERLIN and HAMBURG, BERLIN and FRANKFURT/MAIN and the extension of the BERLIN to LEIPZIG line as far as MUNICH, but [ ] these were never completed.

25X1

25X1

The BERLIN to LEIPZIG line was only used once before the war for the transmission of a television programme. During the war this cable was exclusively used for telephone purposes. The attenuation figure of this cable was 0.16 Neper/km. per 1 MHz = 0.32 Neper/km. per 4 MHz. These figures were taken from the cable in situation.

25X1

25X1

[ ] a hand operated booster station was situated at MUEHRO (M53/E08) and one of the unmanned automatic stations at BIAS (M52/D97).

4. RUSSIAN EXPERIENCE WITH THE DISMANTLED CABLES: After all the cables and booster stations in Germany had been dismantled by the Russians after the war, they planned to increase the transmission capacity of the cables to 8 MHz. After extensive tests had been carried out with the cables, it was found that they were unsuited for transmissions at 8 MHz, especially since the inner reflections of the cable had become so large owing to damage sustained during the dismantling, that the reproduction of the televised picture at more than the original 4 MHz became blurred.

Owing to the fact that it is not always possible in Russia to link up the booster stations to the grid, it was planned by the Russians to have a separate insulated and earthed core in the coaxial cable for the transmission of high tension. However, this plan was dropped at the time

25X1

and [ ] does not know how the Russians will overcome the difficulty, although the original plan is feasible.

/5.

TOP SECRET

- 3 -

5. TEST FIGURES OF COAXIAL CABLES PRODUCED BETWEEN 1946 AND 1947: We

25X1

attach as Annexure 'A' a list of figures [ ] which give test figures of coaxial cables produced by the former AEG, now known as KABELWERK OBERSPREE, BERLIN-OBERSCHLONWEIDE; (Russian Sector), Wilhelminenhof Str. The figures are for 4 different cables, each of which is insulated by a different method.

6. DESCRIPTION OF A COAXIAL CABLE PRODUCED IN OCT 48: We attach as Annexure 'B' a list giving general details of a new cable, which was produced by the KABELWERK OBERSPREE in 1948. It is believed that the cable was actually completed in OCT 48 and taken by the Russians to an unknown destination in Russia.

25X1

This new type of cable requires [ ] booster stations at intervals of 6 to 8 kms. 7

25X1

Copies 1/10 - Addressee  
11/13 - File

25X1

Annexure 'A'

MESSUNGEN AN BREITBANDKABELN FRUEHERER PRODUKTION.

Gemessene elektrische Eigenschaften von koaxialen Leitungen. Innenleiter 2.6 mm  $\phi$ , aeusserer Rohrleiter 9.4 mm innerer  $\phi$  (Bemerkungen: 1 pF = 1 picofarad =  $10^{-12}$  Farad, 1 MHz = 1 Megahertz = 1000 kilocykles per second).

Isolation	Kapazität C pF/m	Wellenwider- stand Z Ohm	Dielektrizi- tatskonst. $\epsilon$	Dämpfung <sup>B</sup> Neper/km bei 1 MHz
Frequenzscheiben	54.0	68.5	1.22	0.33
Styroflex-Kordel und -Folie	53.5	68.9	1.21	0.31
Polyaethylenscheiben 30 mm Abstand	49.5	71.0	1.11	0.30
Toritul-Stegscheiben 30 mm Abstand	47.5	72.6	1.07	0.30

Annexure 'B'BREITBANDKABEL

Das Kabel besteht aus 7 einzelnen koaxialen Leitungen von folgendem Aufbau:

	Durchmesser mm	Gewicht kg/km fuer 7 Leitungen
Innerer Leiter, blanker, harter Kupferdraht	2.6	346
darueber Calitscheiben, 10.2 mm $\phi$ , 2.2 mm dick, 2.7 mm Bohrung, in 25 mm Abstand		119
Aeusserer Leiter, nahtlos gezogener Mantel aus reinstem Aluminium (99.99% Al)	innen 11.0 aussen 13.2 bis 13.4	870
Zwei Lagen Al-Fe-Band 12.5 x 0.2 mm, mit 2 mm Luecke aufgebracht. Luecken beider Lagen um halbe Bandbreite verschoben	14.2	820
Zwei Lagen Papier, 0.15 bis 0.16 mm mit 20% Ueberlappung	15.0	107
		2262

Eine dieser Leitungen bildet die Mitte des Kabels, die uebrigen sechs werden darum mit Rechtsdrill von 1500 mm Drill-Laenge verseilt.

Darueber kommen mehrere Lagen getrocknetes Papier, abwechseln mit Bitumen, und impraegnierten Jute.

Aeusserer Durchmesser	56.6 mm
Gesamtgewicht	3563 kg per km
Fabrikationslaenge	etwa 450 m

25X1

Subject: WERK "H F" (OBERSPRELWERK) BERLIN-OBERSCHÖNHEIDE,  
Ostend Strasse 1-5

25X1

1.

2.

25X1

Report on scientific research and development tasks carried out  
- 18 sheets  
Description and instructions for use of the valve voltage meter  
OSW Type 2407a - 10 sheets  
Technical details for a mercury high-pressure lamp for use with  
all types of electric current - 1 sheet  
Description of the installation for the automatic 'kataphoresieren  
von Kathodenwendeln' - 5 sheets  
Works instruction for the production of insulating pastes -  
3 sheets

25X1

Test results of the oscillograph OSW Type 2396-004 - 4 sheets  
Works Standard 117-1 for aluminium oxyde - 2 sheets  
List of laboratory equipment belonging to the BUERO FUER  
NACHRICHTENWESEN NTO MPSS - 26 sheets  
List of machinery belonging to the BUERO FUER NACHRICHTENWESEN  
NTO MPSS - 12 sheets  
Estimate of the production capacity of the machinery - 5 sheets  
Report on the application of new production methods during the  
month of NOV 49 - 4 sheets  
Report No. 24 giving details of new machines installed during  
the 4th Quarter 1949 - 2 sheets

25X1

Report No. 26 giving details of new machines installed during  
the 4th Quarter 1949 - 2 sheets

TOP SECRET

25X1

Report on the production per head for the month of OCT 49 -  
1 sheet

Offer made for confirmation of the new cost estimate for types  
1a and 1b (TBN), already confirmed in the production plan for  
1949 - 9 sheets

Nomenclature and proportional share of the products made under  
the production plan for 1949 and 1950 - 11 sheets

Monthly report on the production of new types - 5 sheets

Statement giving details on the execution of reparation orders  
for the 2nd six months of 1949 as per 30 NOV 49 - 1 sheet

Statement giving details on the execution of reparation orders  
for the 2nd six months of 1949 as per 10 DEC 49 - 1 sheet

Statement giving details on the delivery of products to the  
District of Koepenick between 1 JAN 49 and 30 NOV 49 - 1 sheet

Minutes of a meeting with regard to measuring instruments -  
3 sheets

First report of the stock taking commission for the WERK "H F",  
dated 20 NOV 49 - 2 sheets

Second report of the stock taking commission, dated 7 DEC 49 -  
3 sheets

Third report of the stock taking commission, dated 7 DEC 49 -  
3 sheets

Minutes of a meeting with regard to measuring instruments dated  
7 DEC 49 - 3 sheets

25X1

[Redacted]

25X1

[Redacted] Subject: Passing of wave meters OSW Type 2407 -  
2 sheets

25X1

[Redacted]

Subject: Passing of wave meters OSW Type 2414a - 2 sheets

TOP SECRET

25X1	[redacted]	Russian GLYBIN by the GEMA
25X1		GKB/TECHNISCHE VERWALTUNG, KOEPENICK - Subject: Estimate for the 1950 production plan - 8 sheets
25X1	[redacted]	FABRIK ISOLIRTER DRABTE, BERLIN S.O. 16, Runge Strasse 25/27 with regard to storage - 1 sheet
25X1	[redacted]	[redacted]
	[redacted]	legal position of the works police - 1 sheet
25X1	[redacted]	reparation orders (addressee
25X1		unknown) - 1 sheet
25X1	[redacted]	Administration for Military orders and production G.S.O.W.G., BERLIN, Prezlauer Allee 60 - 1 sheet

25X1

Distribution: Copies 1-10 Addressee  
11-13 File

25X1

25X1

25X1

Subject: WERK "H F" (OBERSPEERMARK), BERLIN-OBERSCHOENENFELD,  
Ostend Strasse 1-5.

25X1

25X1

samples, which were produced by

BET NTO MPSS and sent to MOSCOW-TREJASINO - 11 sheets.

25X1

and were alleged to contain instruments and appliances built by the  
WERK "H F" during 1949 specially for the Institute Golzowa.

25X1

25X1

Copies 1/10 - Addressee  
" 11/13 - File

25X1



25X1

25X1

Subject: THULKINGISCHE ZELLWOLLE, SCHWARZA (M51/J53)

25X1

25X1

25X1

25X1

25X1

25X1

2. NEWS ABOUT THE MOVEMENTS OF SOME OF THE LEADING PERSONALITIES:

Ing. W. BAUSSMANN returned from Poland on 15 Januar, 1950 after having stayed at LODZ, WARSAW and the former LANDSBERG (053/W08).

they went to Poland for technical discussions with regard to the re-building of a former I.G. plant for the production of Perlon.

3. DISTRIBUTION OF THE SCHWARZA PRODUCTION:

SCHWARZA produces an artificial fibre known under the trade-name of "COM SELLER". This fibre is ideally suited for weaving into parachute fabrics and this may be the reason why practically the entire production is sent to Russia. The fibre is wound on cones, packed into wooden cases marked with Russian letters and then despatched by Russian lorries with the indicator number M.

25X1

25X1

25X1

25X1

Subject:- WERK "H F" (OBERSPREEWERK), BERLIN-OBERSCHOENEWEIDE,  
Ostend Strasse 1 - 5.

25X1

25X1

25X1

Technical description of the 'Polarkoordinat-Oszillograph' - 24 sheets

Test records for the 'Polarkoordinat-Oszillograph' - 4 sheets

Description of OSW Type 2584 - 2 sheets

Description of OSW 2589 - 2 sheets

Description of OSW Type 2651 - 4 sheets

Description of OSW Type 2654 - 4 sheets

Description of OSW Type 2620 - 2 sheets

Description of OSW Type 2668 - 2 sheets

Description of OSW Type 2663 - 2 sheets

Description of OSW Type 2525a - 2 sheets

Description of OSW Type 2623 - 2 sheets

Description of OSW Type 2624 - 1 sheet

Description of OSW Type 2358 or 2558 - 1 sheet

Description of OSW Type 2576 - 3 sheets

Description of OSW Type 2644 - 3 sheets

Description of OSW Type 2647 - 3 sheets

Technical specification for task No.1 of the 1950  
production plan: Oscillograph for decimeter waves  
OSW Type 2702 - 2 sheets

- 2 -

TOP SECRET

25X1

Technical specification for task No. 2 of the 1950  
production plan: Continuation of the development of  
the tyratron valve filled with hydrogen - 1 sheet.

Technical specification for task No. 3 of the 1950  
production plan: 'Laufzeit-Oszillograph zur Ueberwachung  
von Dauerstrich Dezimeterwellensendern' - 1 sheet.

Technical specification for task No. 5 of the 1950  
production plan: Development of a decimeter wave  
oscillographic valve for use in a pulse transmitter  
(Impulssender) with concentric supply of energy to the  
'Messplatte' - 1 sheet

Technical specification for task No. 7 of the 1950  
production plan: Development of a 'Polarkoordinations-  
roehre fuer aperiodisch kippenden' oscillographs - 1 sheet.

Technical specification for task No. 8 of the 1950  
production plan: Development of a mercury high pressure  
valve for an output of 1 kw with 'Starkfoliendurchfuehrung' -  
1 sheet

25X1

Technical specification for task No. 9 of the 1950  
production plan: Research into the possibility of the  
production of a mercury high pressure valve with an  
output of 2 kw with 'Molybdaen-Scheibendurchfuehrung' -  
1 sheet.

Technical specification for task No. 15 of the 1950  
production plan: Cold cathode ray oscillograph - 1 sheet.

Technical specification for task No. 16 of the 1950  
production plan: Frequency analyser - 1 sheet.

25X1

- 3 -

TOP SECRET

25X1

Explanation on the completion of scientific research and development work undertaken for task 1 of the 1949 production plan - 3 sheets.

Report on the inter-departmental production competition during 1949 and prospects for 1950 - 4 sheets.

Interim report on scientific research and development work undertaken for task No. 4 of the 1949 production plan - 2 sheets.

Report No. 29, compiled by the stock-taking commission - 2 sheets.

25X1

Report No. 30, compiled by the stock-taking commission - 2 sheets.

Plan for scientific research and development work to be undertaken by the WERK "H F" during 1950 - 3 sheets

Plan for scientific research and development work to be undertaken by the WERK "H F" during 1950 - 4 sheets.

25X1

25X1

additions to the 1950 production plan - 3 sheets.

Plan for organisational and technical steps to be taken by the WERK "H F" during 1950 - 2 sheets.

Report on the realisation of the plan for organisational and technical steps taken during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

25X1

Return on the production capacity per head during the month of NOV 49 - 1 sheet.

Report on the introduction of new production methods during the month of DEC 49 - 7 sheets.

Report on the completion of the plan for reparation deliveries for the period from 1 JAN 49 to 31 DEC 49 - 1 sheet.

/4.....

TOP SECRET

25X1

Instructions issued with regard to special accounting of money and other expenditure by the TBN for the month of December 1949 - 2 sheets.

Report on the execution of the plan for monetary investments - 1 sheet.

Report on the execution of basic repairs carried out during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

Report on the execution of the plan for basic repairs to be carried out during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

Report on the execution of the plan for capital expenditure during the 4th quarter of 1949 - 1 sheet.

Programme for the installation of special instruments: Capital investment, work and repair for organising the production of instruments - 2 sheets.

Agreement reached with regard to guaranteeing the quality and the financial accounting for thermionic valves - 6 sheets.

25X1

[redacted]  
output and standards - 4 sheets.

List giving details of required workmark amounts for the completion of the tasks set under the production plan - 1 sheet.

Estimated turn-over during 1950 - 1 sheet.

Proposed disposal of the production during 1950 - 1 sheet.

25X1

25X1

[redacted] alteration of the  
technical specification for PRK 2 and PRK 4 - 3 sheets.  
Estimated consumption of precious metals during 1950 - 1 sheet.

25X1

[redacted]  
the production of pure nickel - 3 sheets.

Instructions issued with particular reference to the MARK "H F" - 2 sheets.

Specification of delivery note No. 895229 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895230 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895222 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895223 - 1 sheet.

Specification of delivery note No. 895226 - 1 sheet.

TOP SECRET

25X1 [redacted] Administration for Reparation  
Deliveries, Soviet Control Commission in Germany, for a  
final amount of 2.74 East Marks - 1 sheet.

25X1 [redacted] details of remittances effected to  
creditors and by debtors before the currency exchange -  
1 sheet.

25X1 [redacted] current account of the SOVIET  
A.G. "KABEL" No. 103-00 as per 1 December 1949 - 1 sheet.

25X1 [redacted] current account of the SOVIET  
A.G. "KABEL" No. 104-01 as per 1 December 1949 - 1 sheet.

25X1 [redacted] SOVIET A.G. "KABEL" to the WERK "H F"  
with regard to the possibility of supplying a set of  
duplicate tools

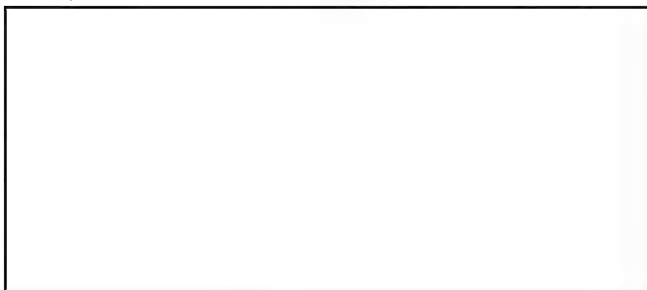
25X1

25X1 [redacted]

DISTRIBUTION:

25X1 [redacted]

25X1



25X1



SUBJECT: WERK "H F" (OBERSPREEWERK), BERLIN-  
OBERSCHOENEWEIDE, Ostendstrasse 1-5

25X1



2. PROPOSED OPENING OF A SELLING BRANCH IN THE WEST SECTOR: It is planned by the Russian Management of the plant to open a selling branch in the Western Sectors of BERLIN. This branch is to sell OSW products for Westmarks and the proceeds of such sales are to finance the purchases of raw-materials urgently needed for the completion of reparation orders.

25X1

3.

DISSOLUTION OF THE "STAB":



25X1



the "STAB" has been dissolved. The

Russian staff has returned to MOSCOW, but it is not known to which Ministry. Only the cars with their German drivers have been taken over by the WERK "H F".

4. DANGER OF THE COLLAPSE OF THE 6TH FLOOR: It is reported that the 6th floor is in danger of collapsing. There are 40 heavy machines operated on this floor and walls as well as floor show cracks. The German Building Police (Bau-Polizei) recommended already in April 1949 the closing down of this floor, but no notice was taken. In the meantime the cracks have become larger and part of the room below had to be closed down owing to the falling down of part of the concrete ceiling. It is now planned to transfer all the machines from the 6th floor to the 3rd floor of the NEF building.

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

25X1

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



Annexure 'A'

25X1

..... Nun zu unserer Sylvesterfeier, die wir diesmal ganz gross begangen haben. Diesmal sind wir vom Schema F abgegangen und feierten Sylvester mit noch einem Ehepaar, einem Junggesellen und unserer Dolmetscherin in einem der besten Restaurants in Leningrad, dem "Metropol". Man musste vorher, wie bei uns in Deutschland, einen Tisch bestellen. Es kostete pro Person die Kleinigkeit von 150 Rubeln; in diesem Preis war aber alles enthalten, was man trank und ass und zwar in solcher Reichhaltigkeit, dass wir bequem noch 6 Personen hatten satt bekommen. - Um 11 Uhr abends war Einlass in den wundervoll geschmueckten grossen Saal. Der Saal ist an und fuer sich schon herrlich anzusehen: grosse Kristalluester funkeln an der Decke, die Riesenfenster sind mit blauen Damastgardinen behangen, 4 enorm grosse Weihnachtsbaeume standen geschmueckt in den Ecken. Ueber dem Podium der sehr guten Jazzkapelle ein bunt illuminiertes Spruch: ..... (Russische Buchstaben), was gutes neues Jahr heisst. Die weiss gedeckten Tische waren wie im Schlaraffenland bestellt mit den herrlichsten Dingen. Damit ihr einmal einen Begriff bekommt, was fuer jeden einzelnen bestimmt war, nachstehend das Menu:

Getraenke:

Sekt, suess  $\frac{1}{2}$  Flasche  
 Portwein 100 gr.  
 Wodka 100 gr.

Fruechte:

Apfel, Mandarinen  
 Birnen, Weintrauben

Kalte Platte:

Kaviar  
 Balik m. Zitrone (Bester Raucherfisch)  
 Lachs  
 Butter  
 Stoeckchen im Aspik  
 Huhn in Majonaise  
 Salat "Neujahr"  
 Gefluegelpastete  
 Weiss- und Schwarzbrot

Warme Speisen:

Forelle in holl. Sauce  
 Filetbraten "Metropol"  
 Schlagsahne mit Keks

Ausser den warmen Speisen war bereits alles fuer die betreffende Personenzahl, fuer die der Tisch bestellt war, eingeteilt und aufgebaut.

Die 3 Sektflaschen, die verschiedenen Glaeser, die silbernen Platten mit all den Herrlichkeiten und die hochgetuermte Obstschale, all das bot ein bezauberndes Bild, das schaeatzungsweise 60 bis 70 Tische in dieser Weise aufgebaut waren. - Um 12 Uhr begann die Kapelle zu spielen, nachdem alle aufgestanden waren und sich ein gutes neues Jahr gewuenscht hatten. Die Mitte des Saales war frei zum Tanz. Die Damen trugen alle lange Abendkleider, die Herren Uniformen oder Gesellschaftsanzug. Wir tanzten jeden Tanz und die Russen forderten fleissig auch unsere Damen zum Tanz.

Dazwischen versuchten wir immer wieder, all der lukullischen Genuesse Herr zu werden, was uns aber beim besten Willen nicht gelang. Eine gute Saengerin und ein ebensolcher Saenger sorgten fuer Stimmung, die auch wirklich glaenzend war. Viel zu frueh war es ploetzlich 5 Uhr und Schlus. Nun ging es in die Palae und hinaus in die klare Winterluft (18°). Zwei Taxis brachten uns in unser Haus.

Es war einer der schoensten Tage, die man nicht vergisst. ....

25X1

25X1

SUBJECT: B.T.B. (VERSUCHS-UND FORSCHUNGS-INSTITUT DES  
MINISTERIUMS FUER AUTOMOBIL INDUSTRIE, MOSCOW),  
BERLIN-ADLERSHOF (Russian Sector), Rudower  
Chaussee 26-30

25X1

2. ORIGINAL CARBON COPIES OF DOCUMENTS DESPATCHED TO RUSSIA: During the

last few days of the existence of B.T.B. SIMILAR received instructions  
to destroy by fire all old records held on the files relating to tasks  
dealt with in 1945. [ ] a fairly representative

25X1

25X1

selection of these documents [ ] are forwarded [ ]

25X1

per the following details:

25X1

[ ] Aufbau und Durchfuehrung einer Schadensfor-  
schung im Motorenbetrieb und ihre praktische Auswertung zur  
Schadenverhuetung - 5 illustrations. The text of the report  
is missing.

25X1

[ ] Vor- und Nachteile der verschiedenen Ver-  
brennungsverfahren beim Fahrzeugdieselmotor - 24 technical  
drawings. The text of the report is missing.

25X1

[ ] Die Oelreinigung im Kraftfahrzeugmotor  
(Faserstoff-Oelreiniger, der einen Wechsel des Motorenoels  
ueberfluessig macht). - 21 sheets of text (pages 1 to 34 of the  
text are missing), 48 illustrations.

25X1

[ ] Betrieb von Fahrzeug-Zweitaktmotoren mit  
Fluessiggas - 19 illustrations. The text of the report is  
missing.

25X1

[ ] Versuche ueber den zeitlichen Ablauf  
der Spuehlstroemung - 7 illustrations. The text of the  
report is missing.

25X1

[ ] Hilfsmittel zur Steigerung der Feuerungs-  
leistung und des Feuerungswirkungsgrades (Feuerraumgestaltung,  
Luftsteuerung und Wirbelung) - 44 sheets of text, 29 illustrations  
and 14 negatives.


25X1


[ ] Die Waermebehandlungsentscheidender Faktor  
fuer die Festigkeit hochwertiger Motorenteile aus Stahl. -  
28 illustrations. The text of the report is missing.

- 25X1 [ ] Beitrag zur Verwendung von Schwelkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstaetten an die Brenneigenschaften des Schwelkoks - 66 sheets of text and 28 illustrations.
- 25X1 [ ] Erfindungen auf dem Gebiet der Gemischbildung und Verbrennungsverfahren fuer Verbrennungsmotoren, zusammengestellt an Hand der Patentliteratur - 84 sheets of text.
- 25X1 [ ] Ueberblick ueber die Entwicklung des Kohlenstaubmotors - 121 sheets of text. The illustrations to the report are missing.
- 25X1 [ ] Dieselelektrische Antriebe fuer Strassen Lastzuege - 35 sheets of text. The illustrations to the report are missing.
- 25X1 [ ] Konstruktion und Wirkungsweise moderner Fahrzeugmotorenvergleich: 1st Interim Report - 25 sheets of text and 15 illustrations.
- 25X1 [ ] Messung von Klopfeschwingungen - 32 sheets of text and 47 illustrations.
- 25X1 [ ] Messen von Ventilsfederschwingungen - 14 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Klopfestigkeit und Zuendwilligkeit (Anerkannte Ergebnisse und ungeloeoste Aufgaben der Forschung) - 107 sheets of text and 38 illustrations.
- 25X1 [ ] Die Entwicklung des Fahrzeug-Dieselmotors in Deutschland - 56 illustrations (illustrations No. 33 and 34 are missing). The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Daenende oder stehende Ventile? - 39 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Kolbenfragen im Fahrzeugmotorenbau - 3 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Richtlinien fuer die Pruefung von Motoren - 29 sheets of text and 10 illustrations.
- 25X1 [ ] Der vollkommene Ausgleich aller beschleunigten bewegten Massen bei Mehrzylinder-Kolbenmotoren zwecks Vermeidung von Erschuetterungen - 15 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Gesamtschwefel, aktiven Schwefel, Schwefel-Kohlenstoff und Thiophen in Kraftstoffen - 17 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Festigkeitsrechnung bei ungleichfoermiger Beanspruchung - 24 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Berechnung von Brennstoffdieseln, insbesondere der Bauart 1'Orange - 19 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Versuche an Generatorfahrzeugen mit Aufladung - 5 illustrations. The text of the report and some of the illustrations are missing.
- 25X1 [ ] Die Grundsaeetze fuer die Typung im allgemeinen Verbrennungsmotorenbau - 5 illustrations. The text of the report is missing.

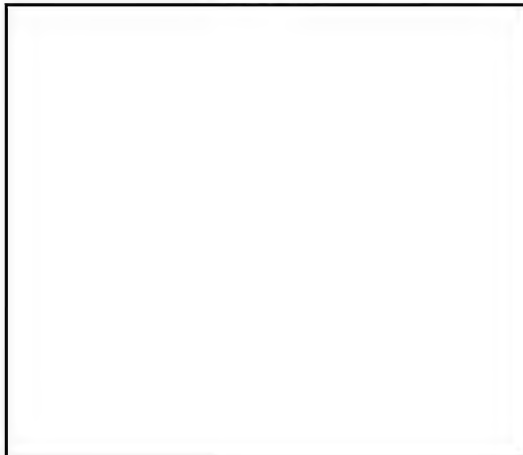
- 25X1 [ ] Berechnung und Entwicklung von Zahnraedergetrieben fuer Leichtmotoren - 17 illustrations and 1 table of figures. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Gelaufende Kuehler, insbesondere fuer Fahrzeuge mit Dampftrieb - 28 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Die Hilfsmaschinen bei Dampffahrzeugen und ihr zweckmaessiger Antrieb - 52 sheets of text. The illustrations to the report are missing.
- 25X1 [ ] Ueber die Beziehungen zwischen der Beschaffenheit der Oberflaeche von Konstruktionsteilen eines Motors und dem Verhalten im Betriebe - 76 sheets of text and 8 illustrations.
- 25X1 [ ] Die messende Erfassung der Oberflaecheneigenschaften von Motorteilen durch Mikrountersuchung - 11 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Die Entwicklung hochfester Aluminium-Knetlegierungen in ihrer Beziehung zu den Werkstoffproblemen des Motorenbaues - 69 sheets of text and 27 illustrations.
- 25X1 [ ] Spannungskorrosion - 6 illustrations. The text of the report and illustrations 1, 2, 3 and 8 are missing.
- 25X1 [ ] Die Darstellung der Zustandsgroessen von Benzol und Benzoldampf im IS-Diagramm - 1 illustration and 6 tables of figures. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Aufbau des Siemens-Oszillographen - 1 illustration. The text of the report and illustrations 1 to 15 are missing.
- 25X1 [ ] Anwendungsgebiete des Elektrokarrens - 2 illustrations. The text of the report and the remaining illustrations are missing.
- 25X1 [ ] Schaltgeraete fuer Obusse, Elektrokarren und Elektrolastwagen - 39 illustrations. The text of the report and illustrations 6, 21 to 25, 29, 36, 37, 45 and 46 are missing.
- 25X1 [ ] Fehrbares Laboratorium zur Untersuchung von Kraftstoff und Schmierstoffen - 4 illustrations. The text of the report is missing.
- 25X1 [ ] Bewertung von Schmieroelen vom Motorischen Standpunkt aus - 1 sheet of text (introduction only) and 13 illustrations. The rest of the text is missing.
- 25X1 [ ] Der Einfluss von Schmieroelen auf das Einlaufen von Motoren und das Anlassen der Motoren in der Kaelte - 31 sheets of text and 6 illustrations. Illustrations 4, 5 and 8 are missing.
- 25X1 [ ] Untersuchungen ueber die Beanspruchung von Kurbelzapfen und der Pleibstangenlager von schnelllaufenden Dampfmaschinen fuer schwere Strassenfahrzeuge - 33 sheets of text, 14 illustrations and 2 tables of figures.
- 25X1 [ ] Drehzahlenbegrenzung durch die Ventilsteuerungen bei Viertakt-Ottomotoren - 29 sheets of text. The illustrations to the report are missing.
- 25X1 [ ] Untersuchung ueber die Annaeherung des wirklichen Motors und die theoretisch moegliche Grenze der Brennstoffausnutzung. 31 illustrations and 31 negatives. The text of the report is missing.

TOP SECRET

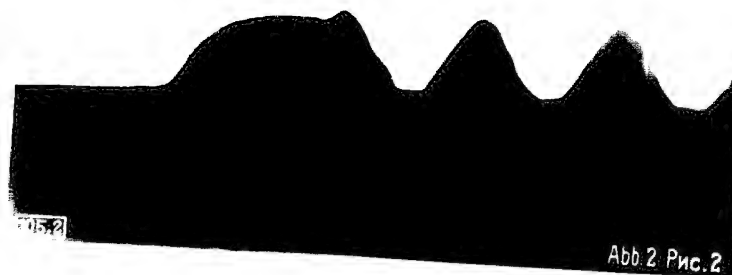
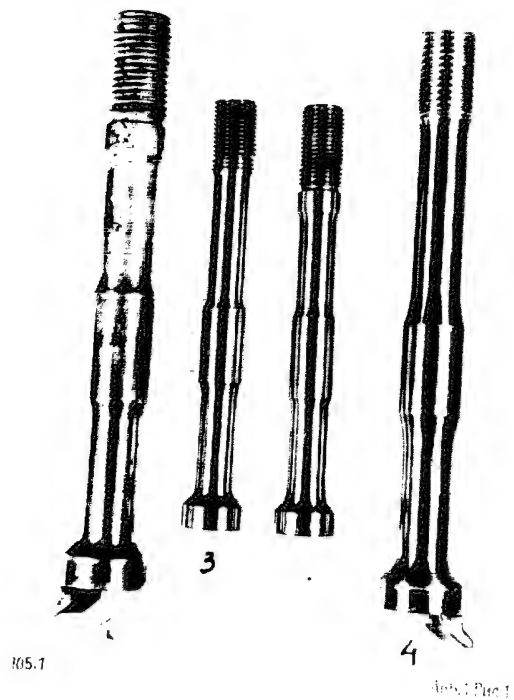
25X1  Modellversuche ueber die Strcemung der  
Spuehlluft im Zylinder von Zweitaktmotoren - 14 illustrations  
the text of the report is missing.

25X1  Geschichte der deutschen Fahrzeugmotoren-  
Forschung Part I paragraph 1 - 9 sheets of text.

25X1



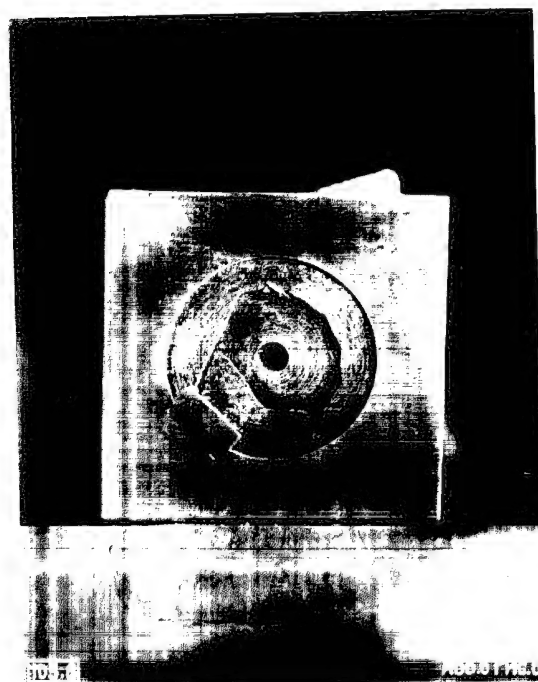
25X1





105.5

Рис. 5



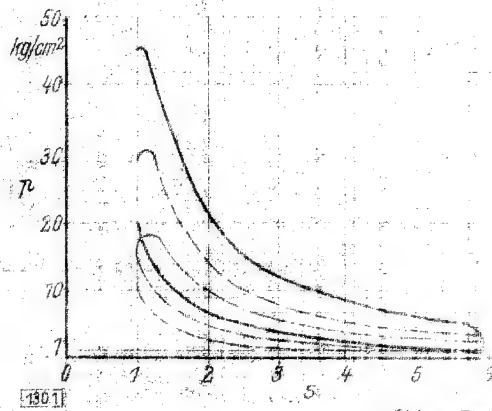


Abb. 1 Pac. 1

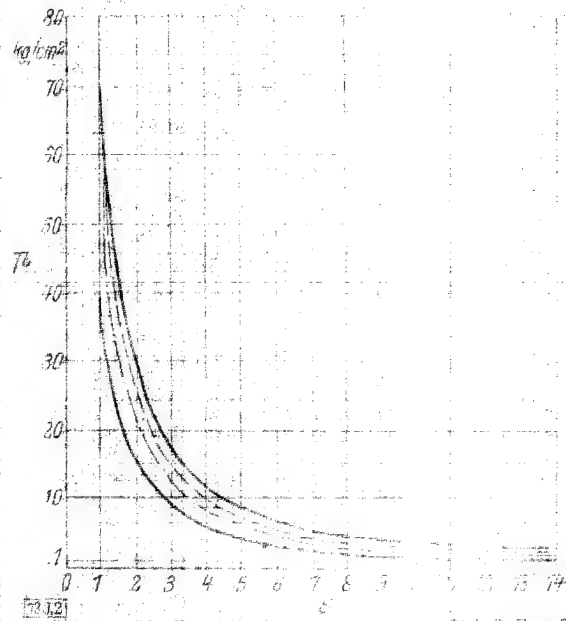


Abb. 2 Pac. 2

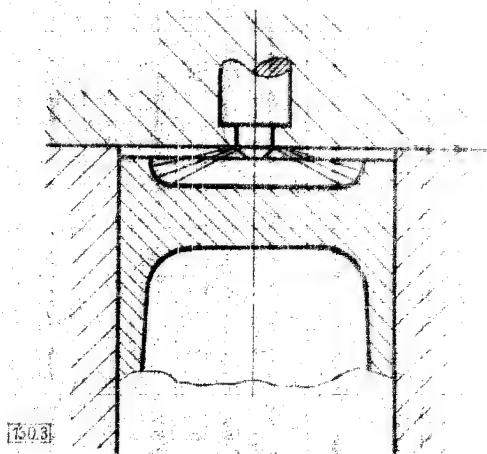


Abb. 3 Pac. 3

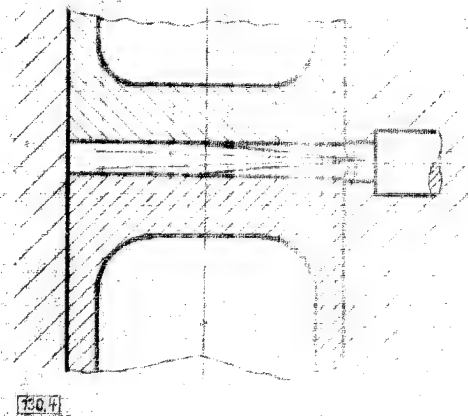
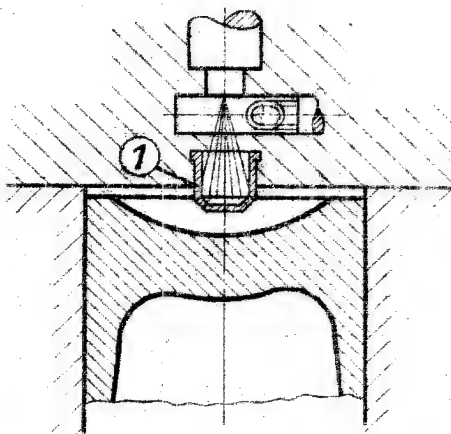


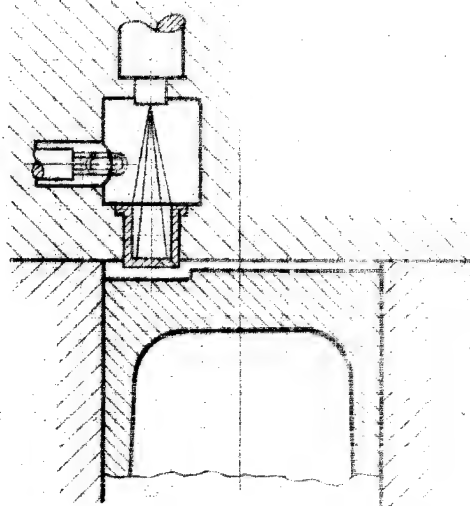
Abb. 4 Pac. 4





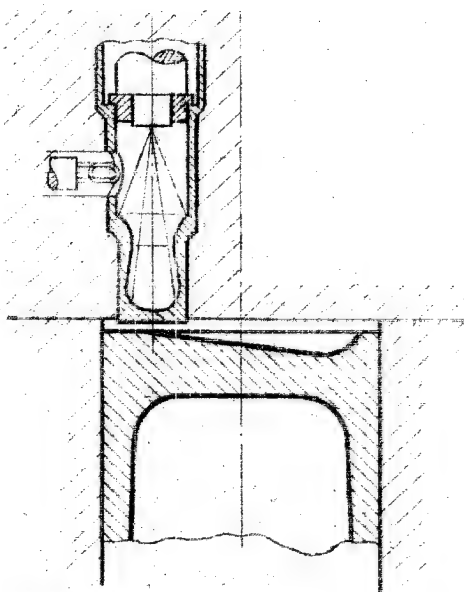
130.5

Abb. 5 Pnc. 5



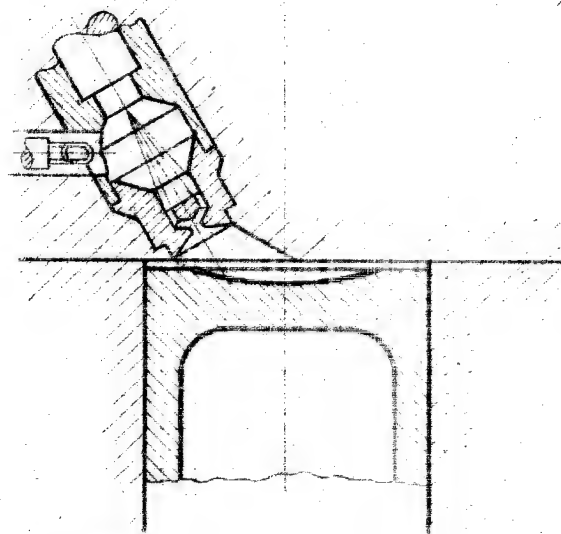
130.6/I

Abb. 6/I Pnc. 6/I



130.6/II

Abb. 6/II Pnc. 6/II



130.7

Abb. 7 Pnc. 7

130.8

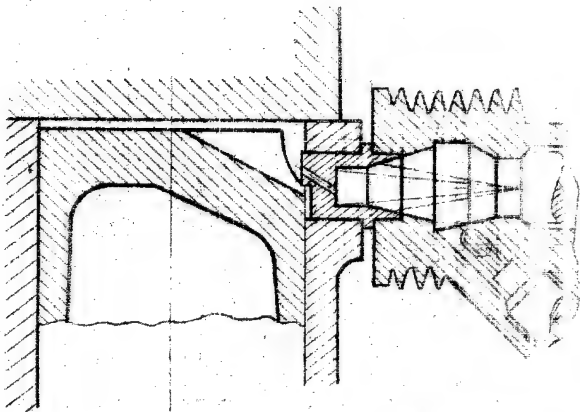


Abb. 8 Pnc.

130.9

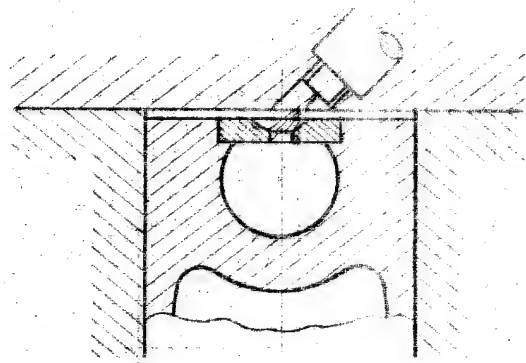


Abb. 9 Pnc. 9

130.10

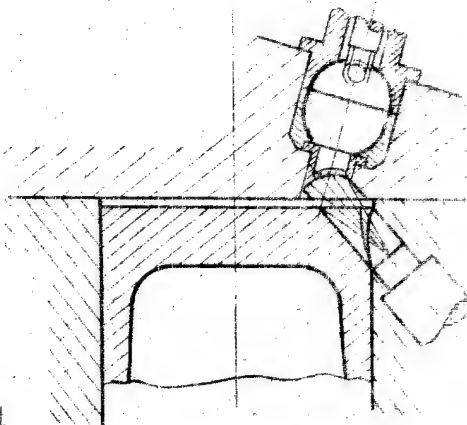


Abb. 10 Pnc. 7

130.11

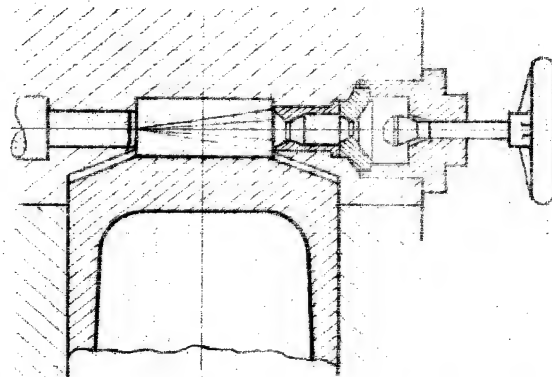
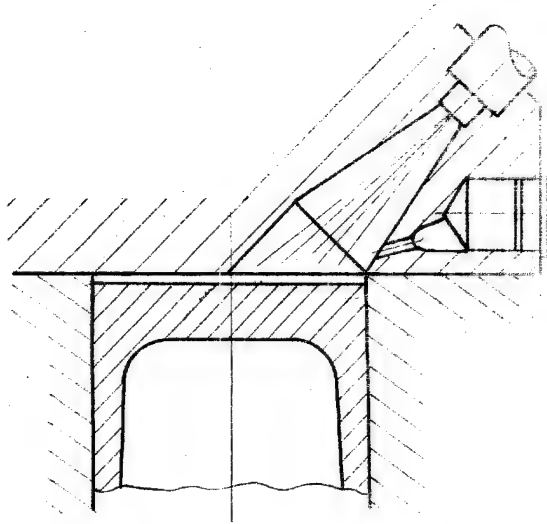
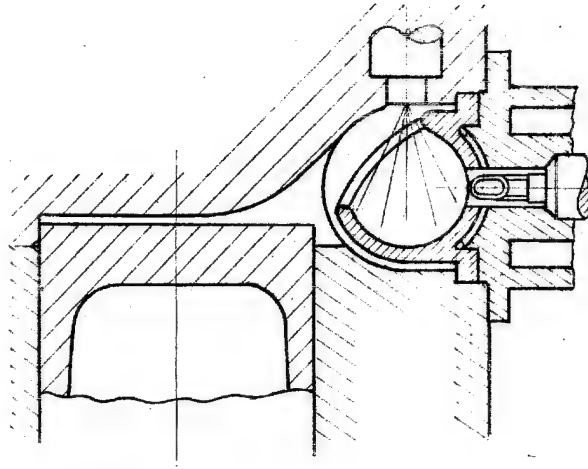


Abb. 11 Pnc. 11



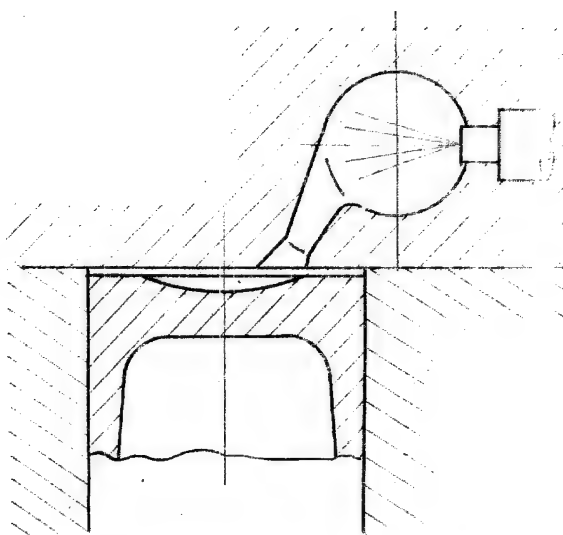
130.12

Abb.12 Рис.12



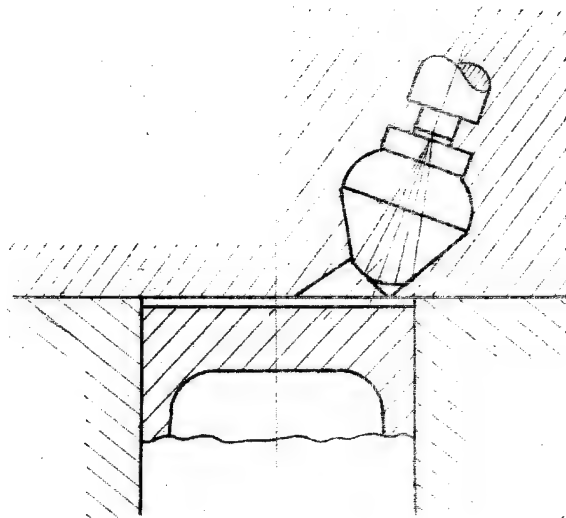
130.13

Abb.13 Рис.13



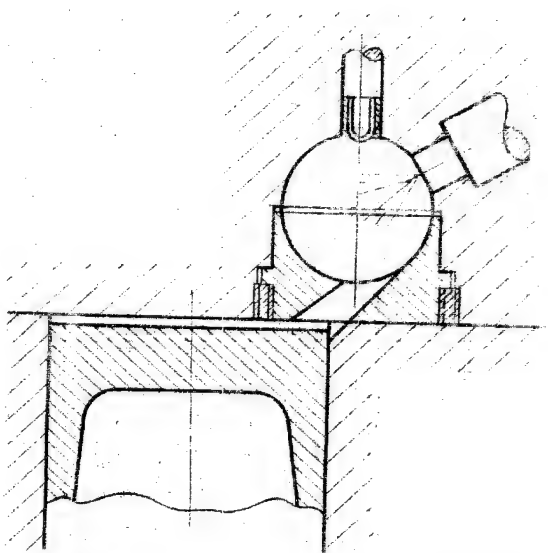
130.14

Abb.14 Рис.14



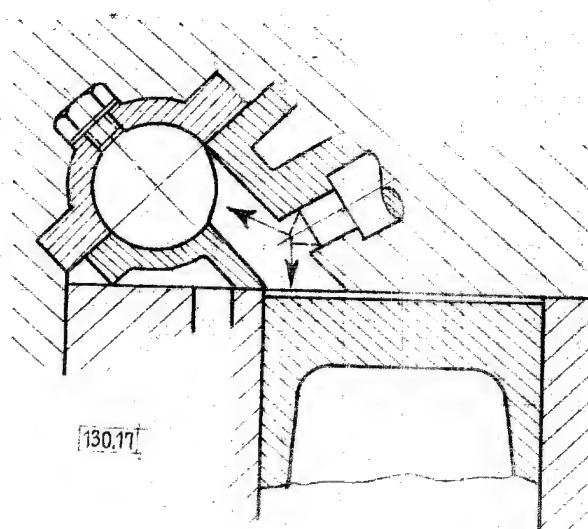
130.15

Abb.15 Рис.15



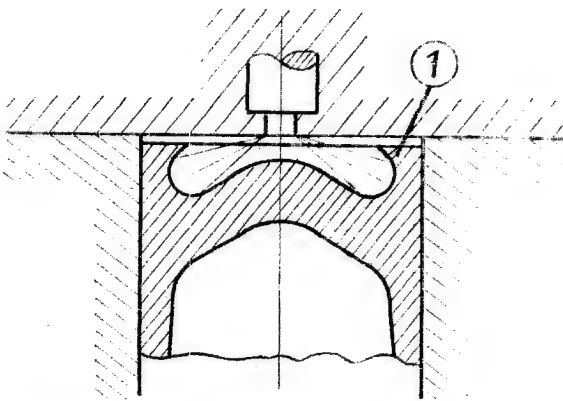
130.16

Abb.16 Pnc. 5



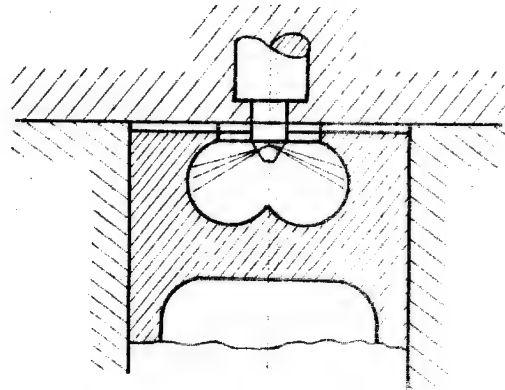
130.17

Abb.17 Pnc. 17



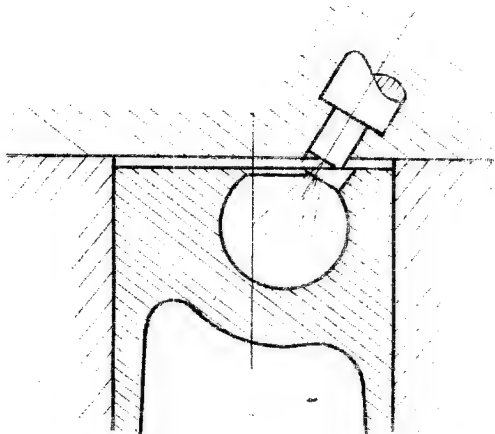
130.18

Abb.18 Рис.18



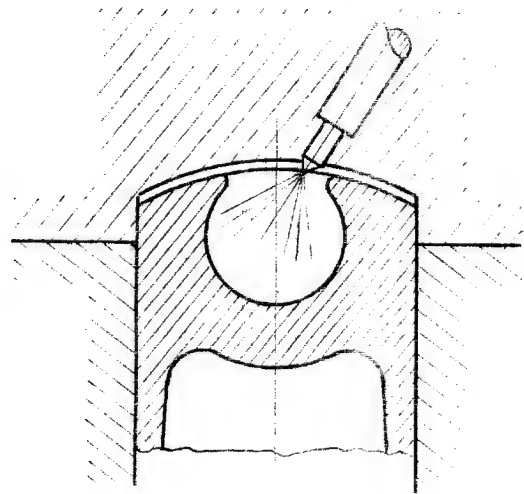
130.19

Abb.19 Рис.19



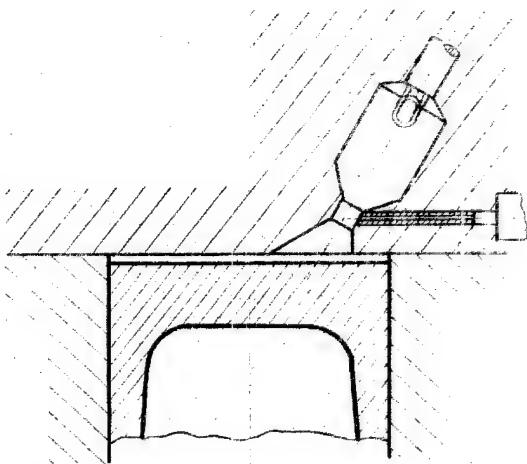
130.20

Abb.20 Рис.20



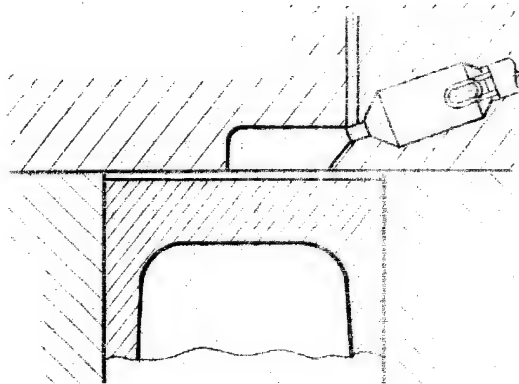
130.21

Abb.21 Рис.21



130.22

Abb.22 Рис.22



130.23

Abb.23 Рис.23

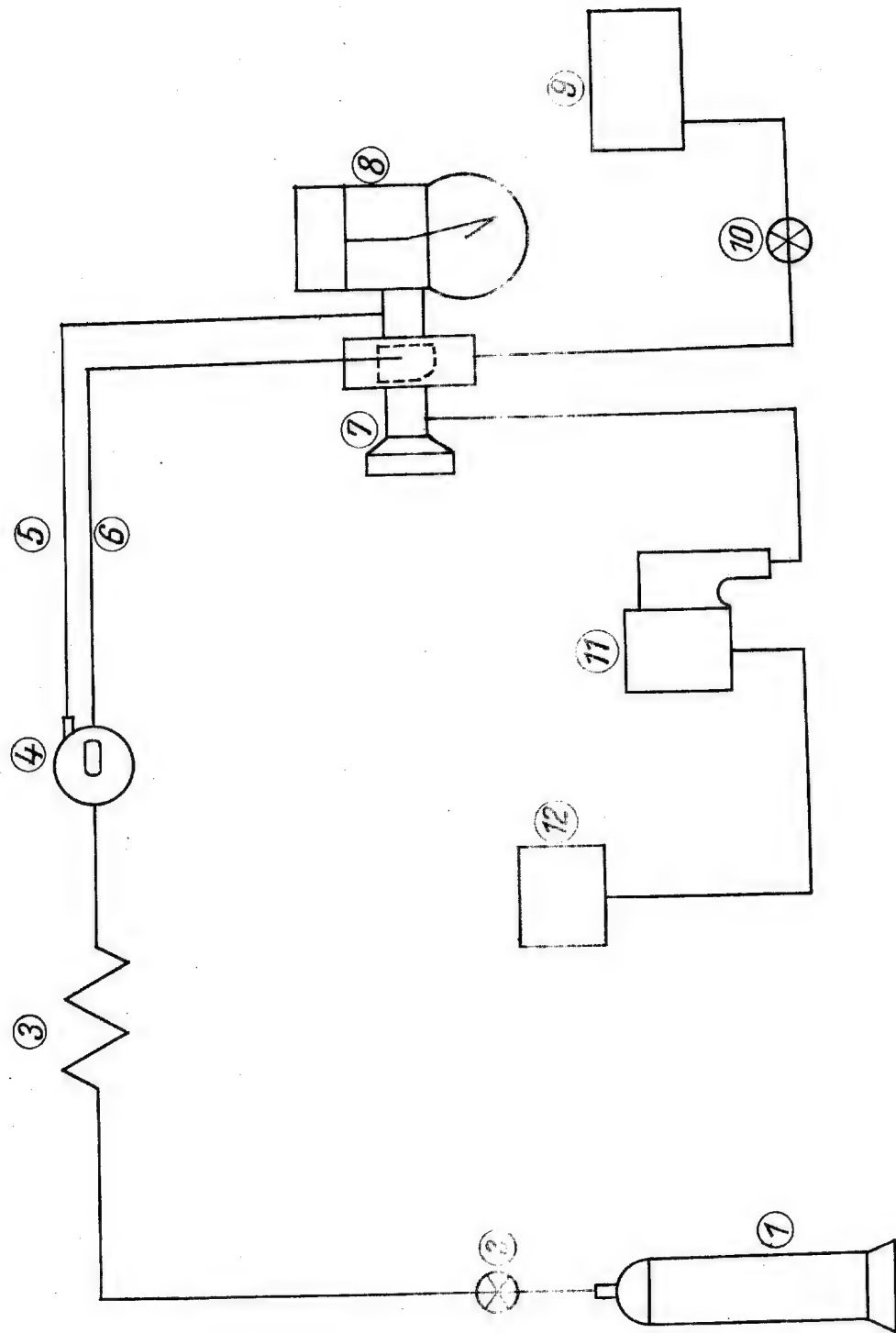


Abb.1 PMC.1

136.1

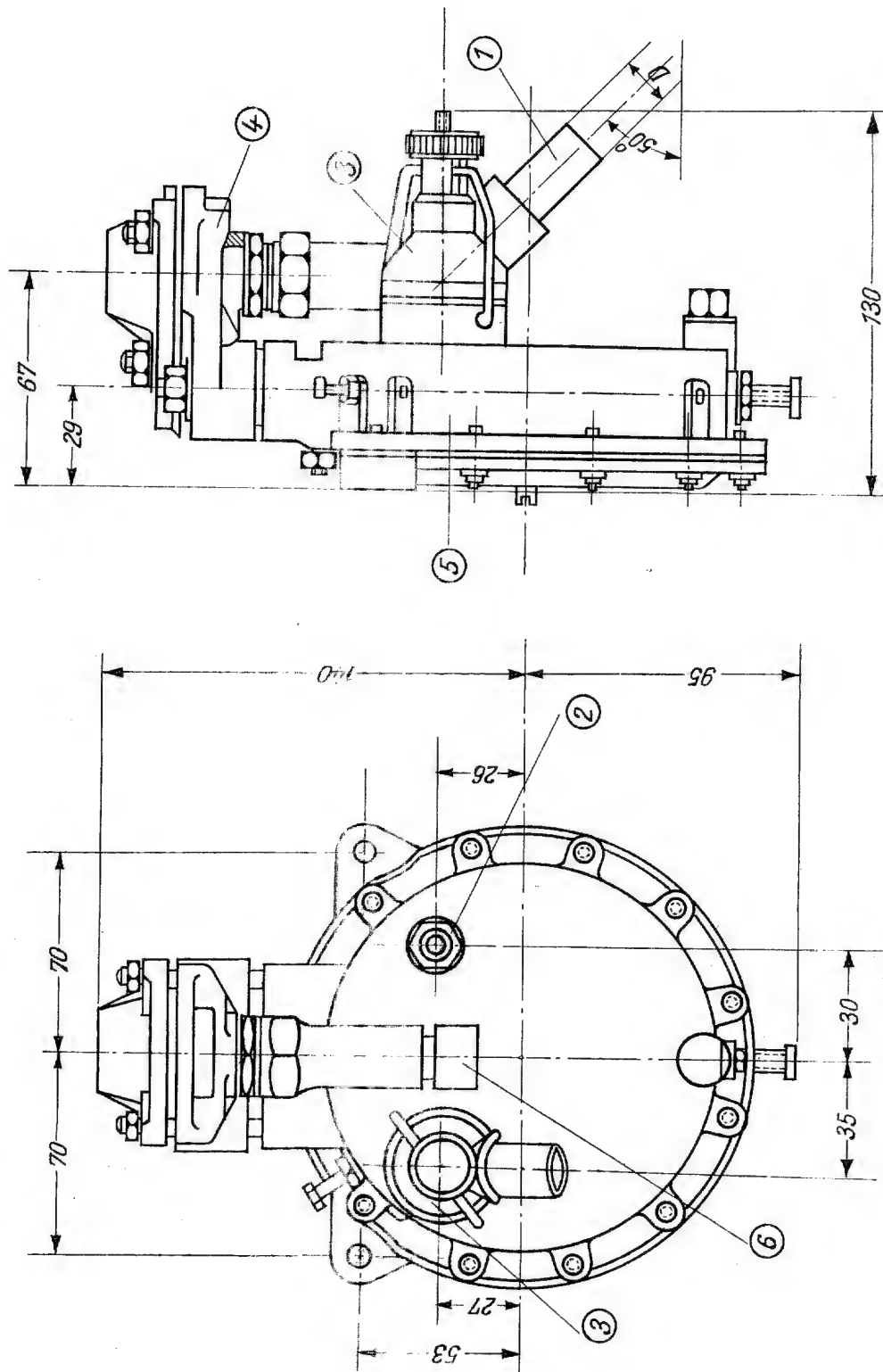
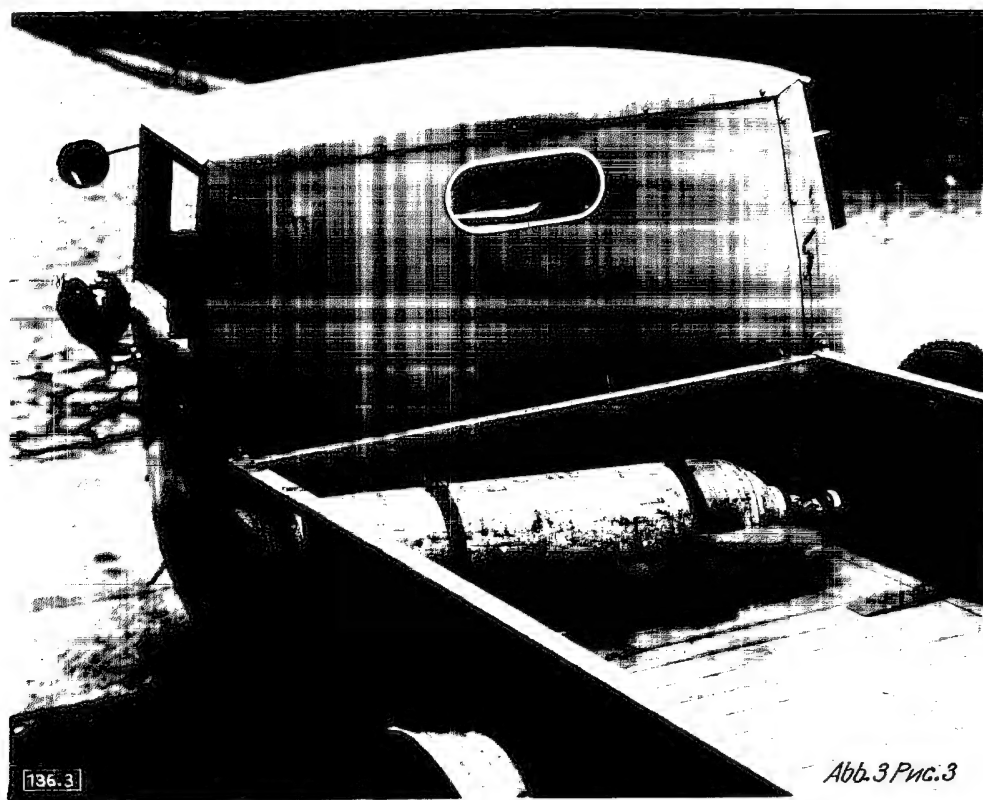


Abb.2 PИC.2

136.2





Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

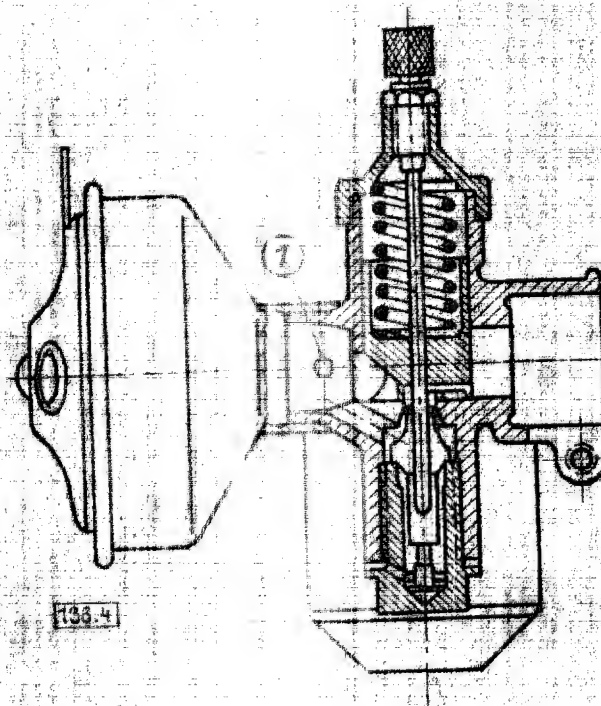
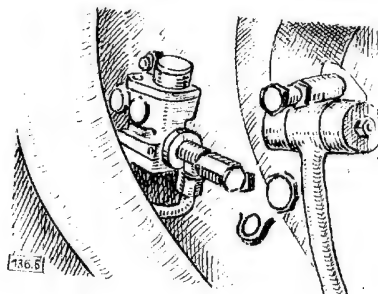
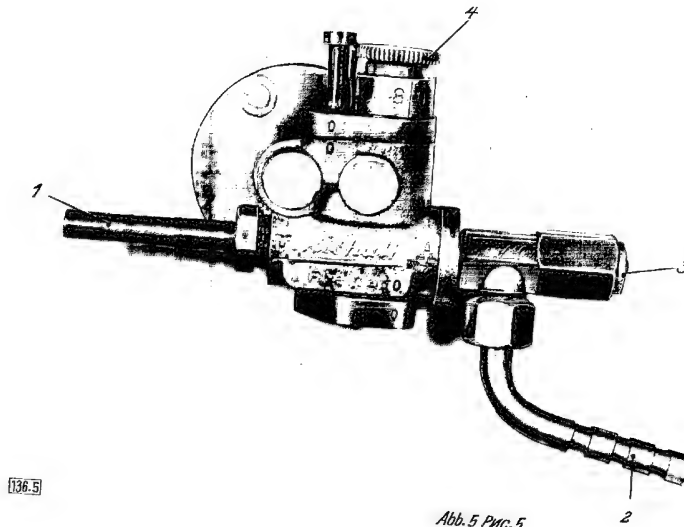


Abb. 4 Pnc. 4

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



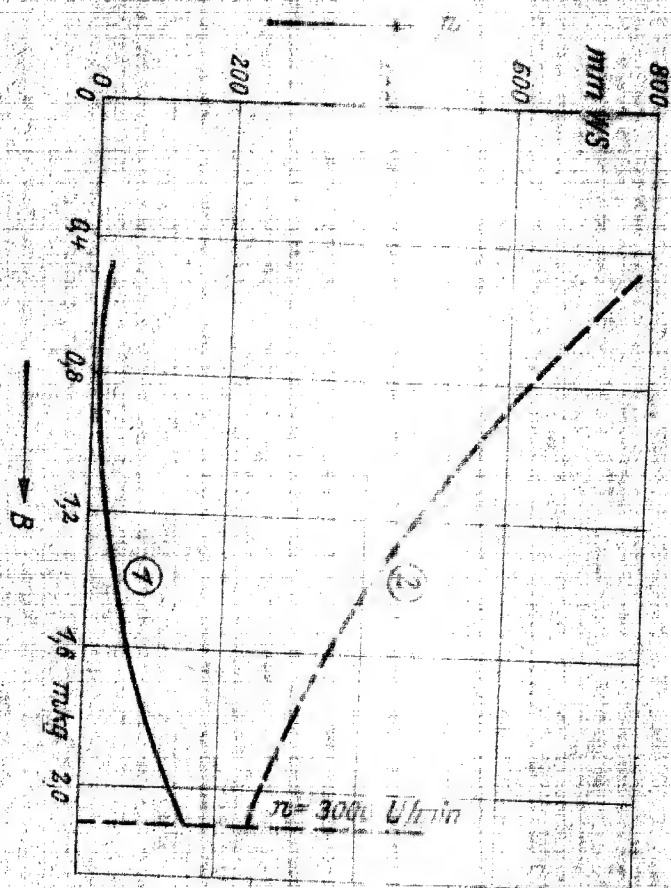
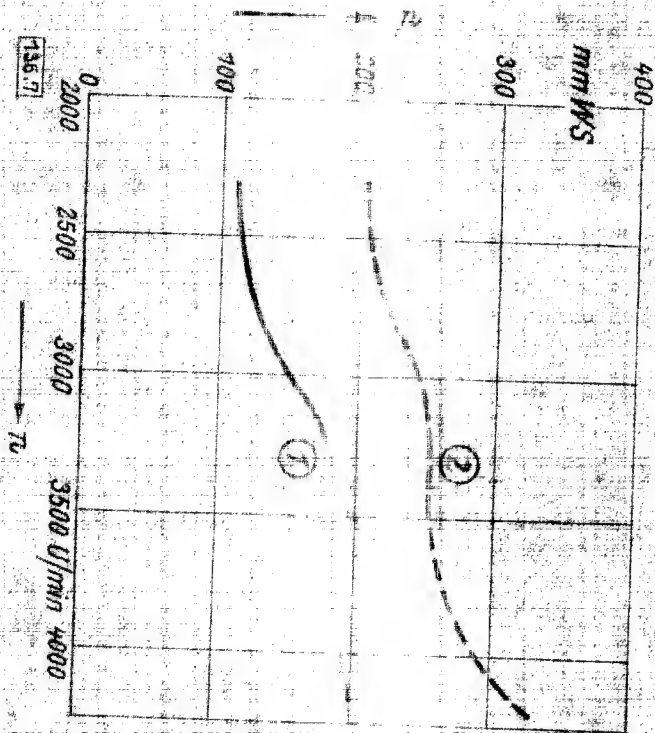
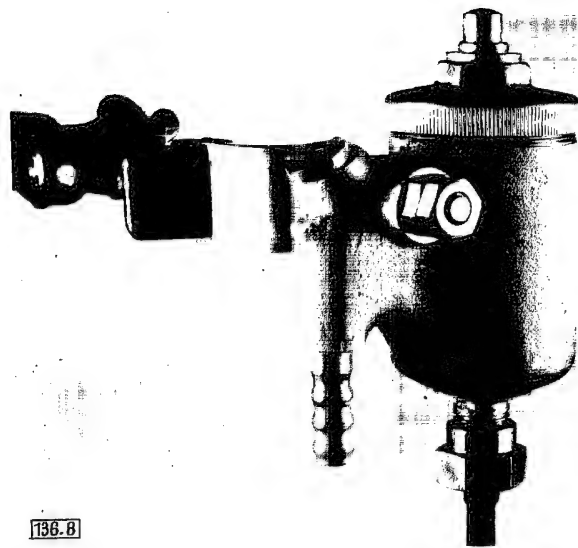


Abb. 7 Рис. 7



*Abb. 8 Рис. 8*

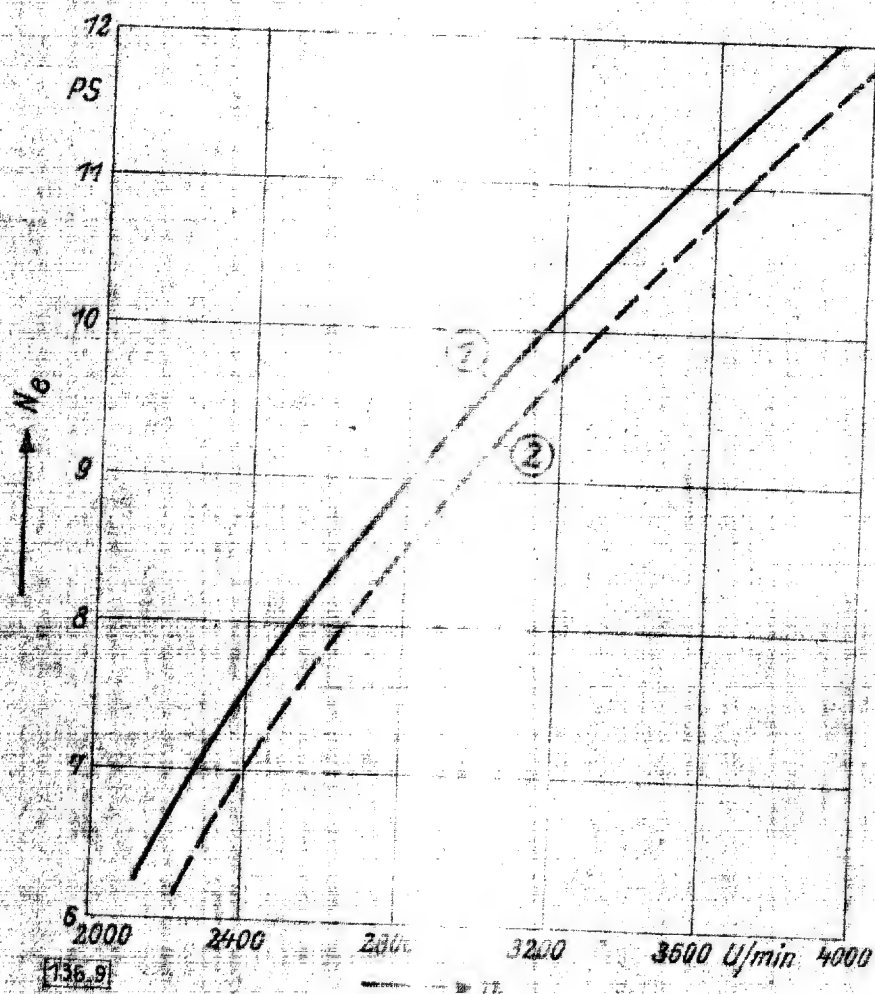
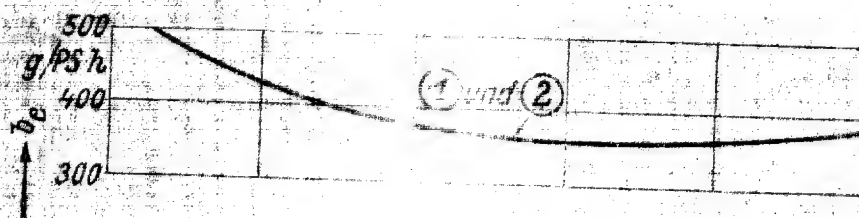


Abb. 9 Рис. 9

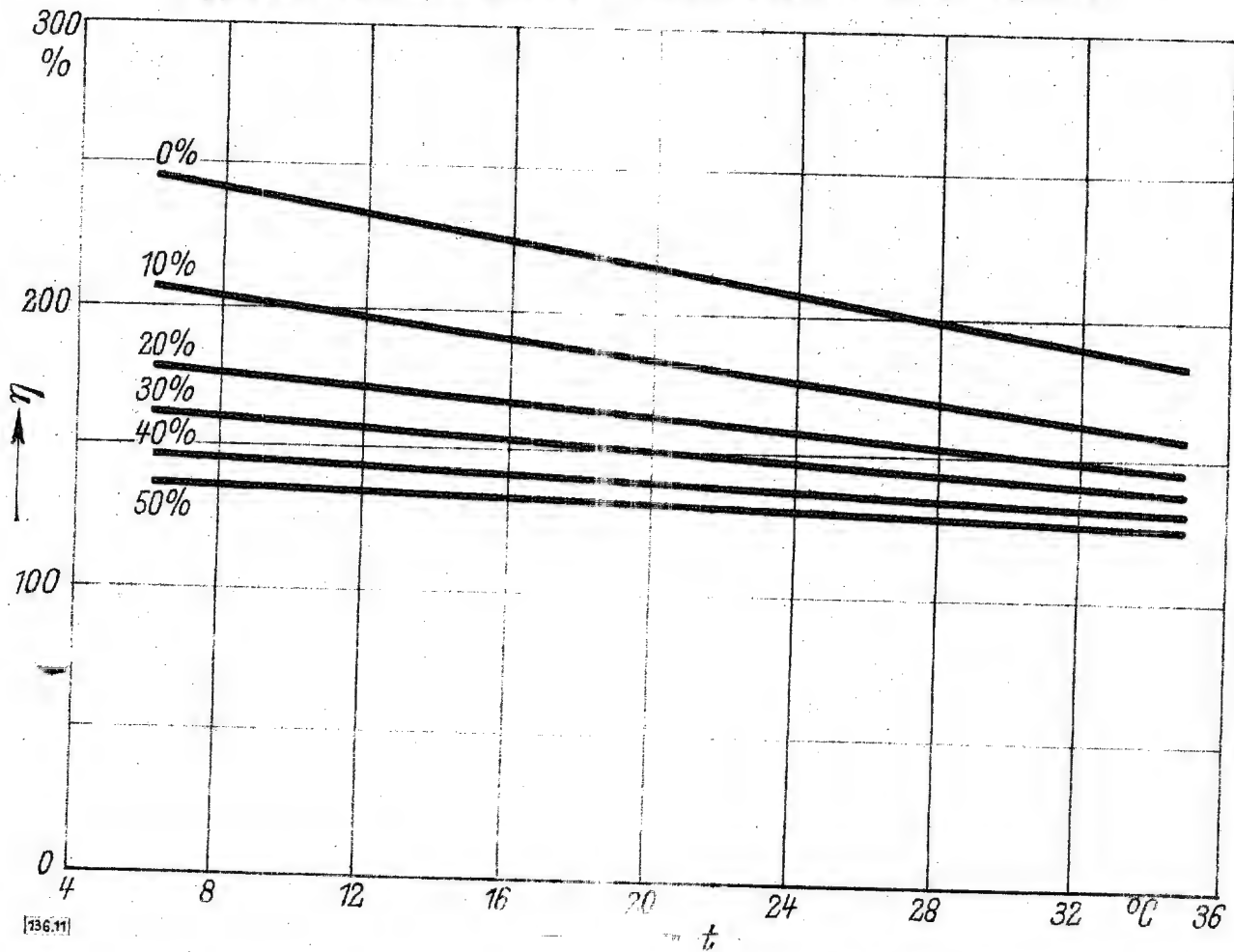
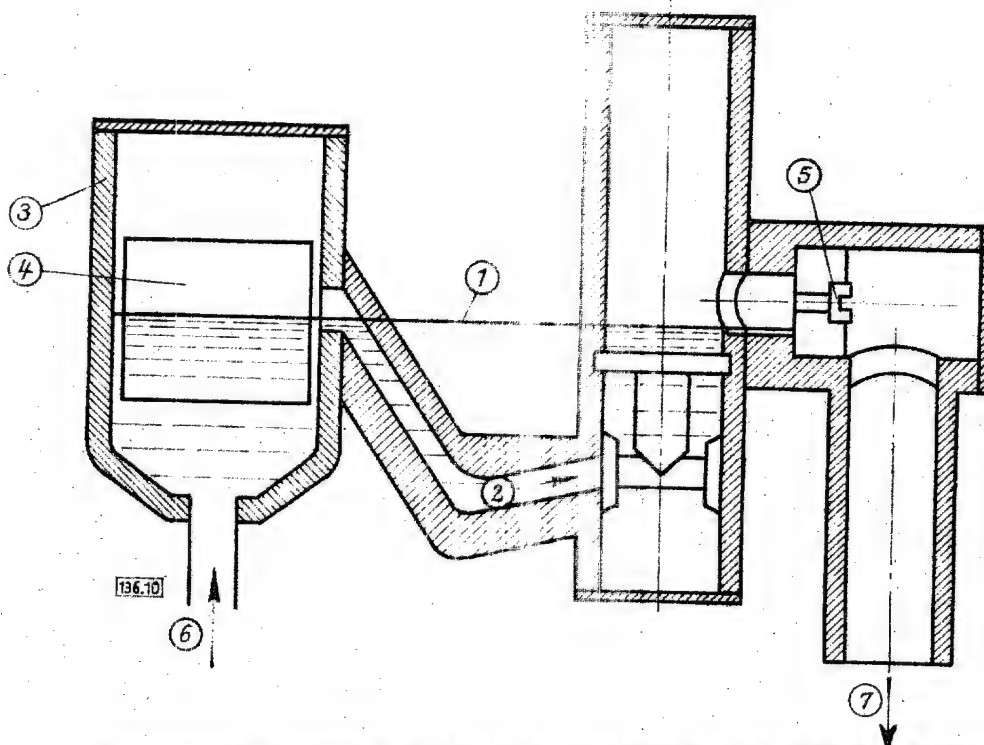


Abb.11 Рис.11



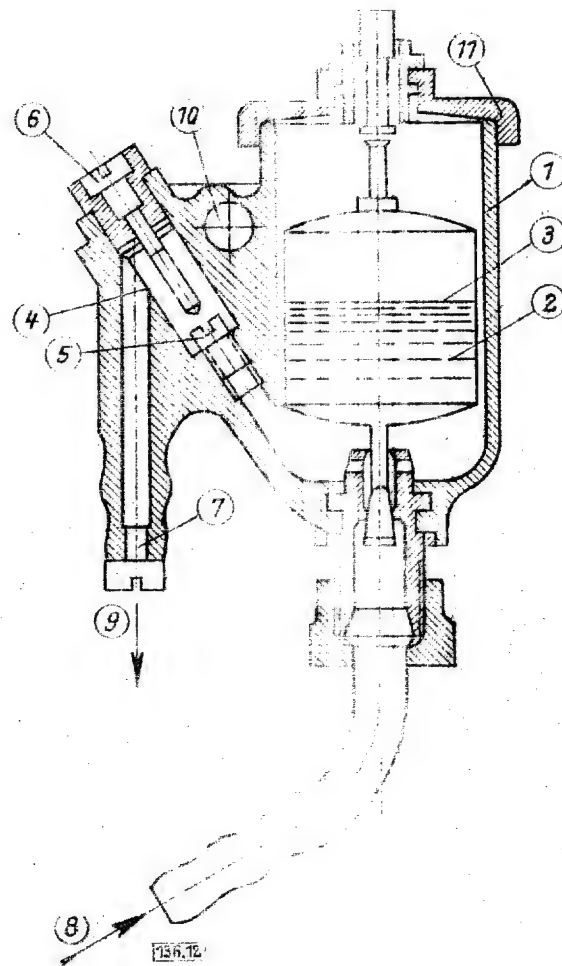
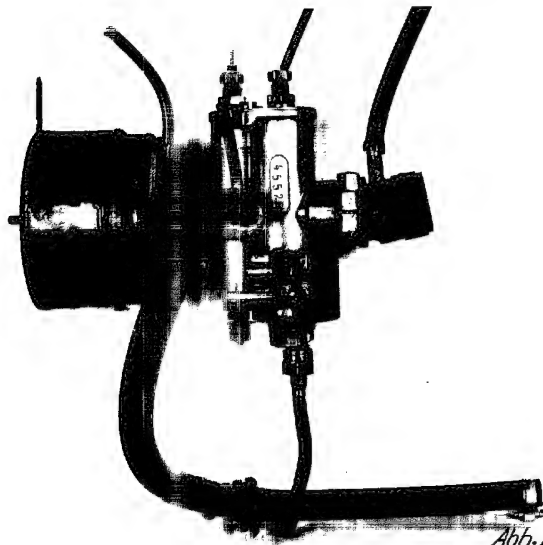


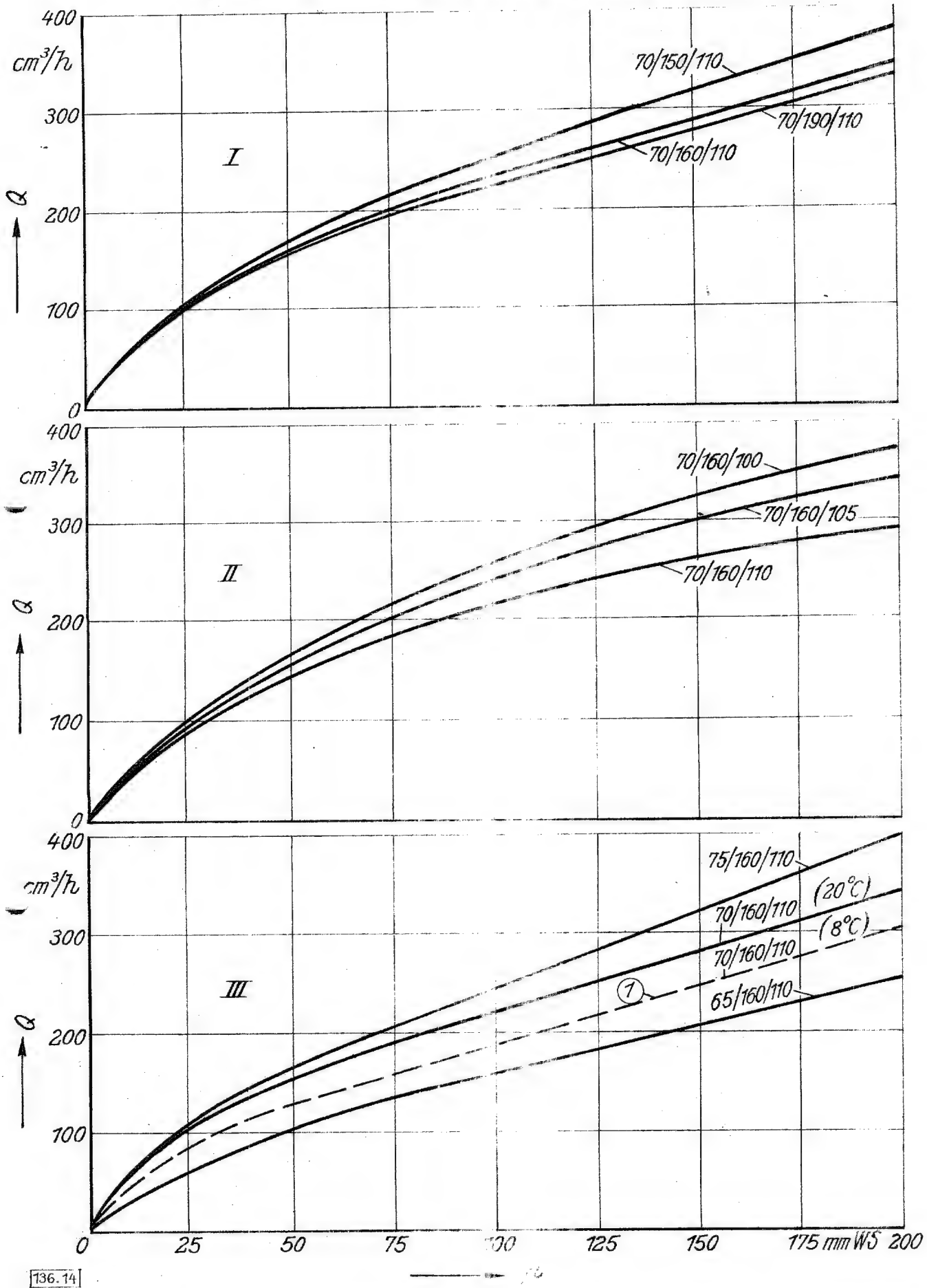
Рис. 12





136.13

Abb. 13 Рис. 13



136.14

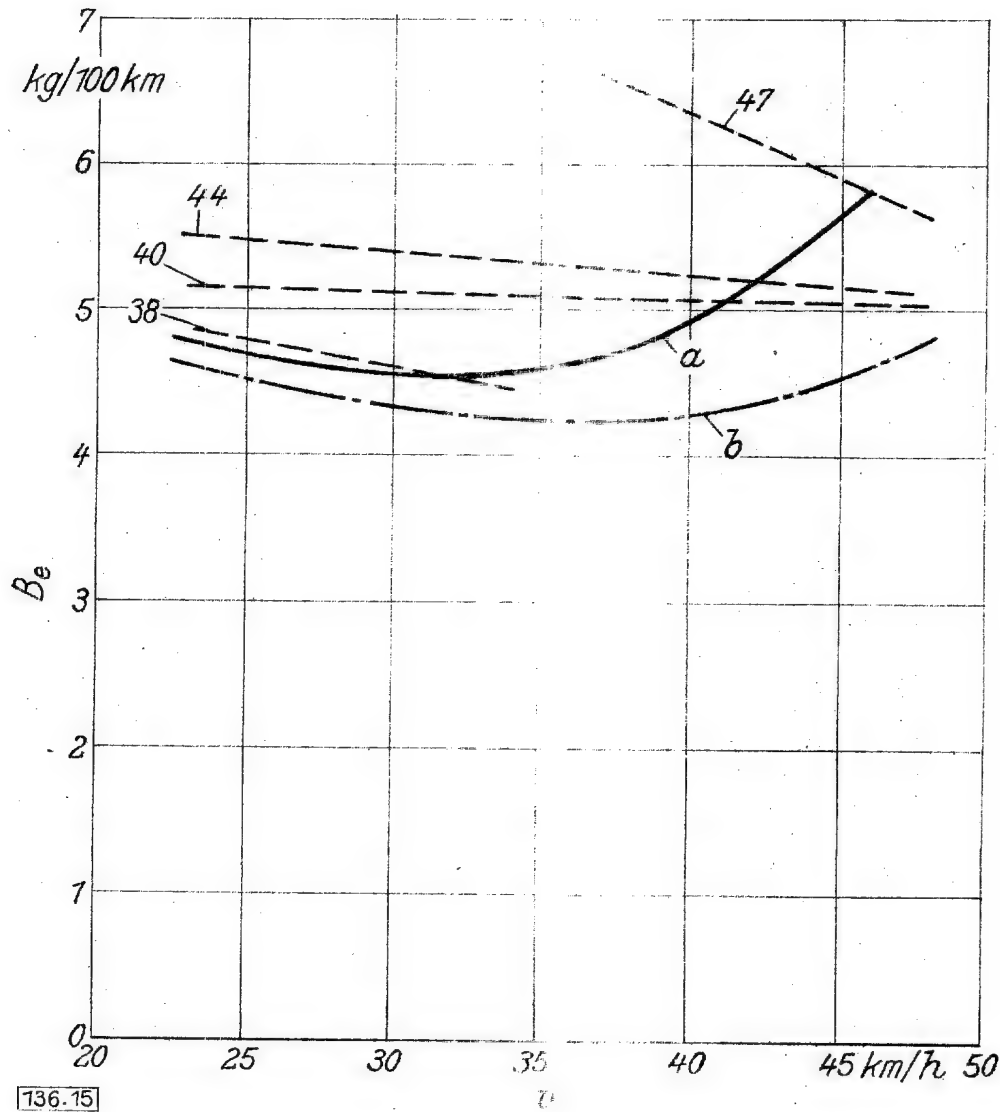


Abb. 15 Рис. 15

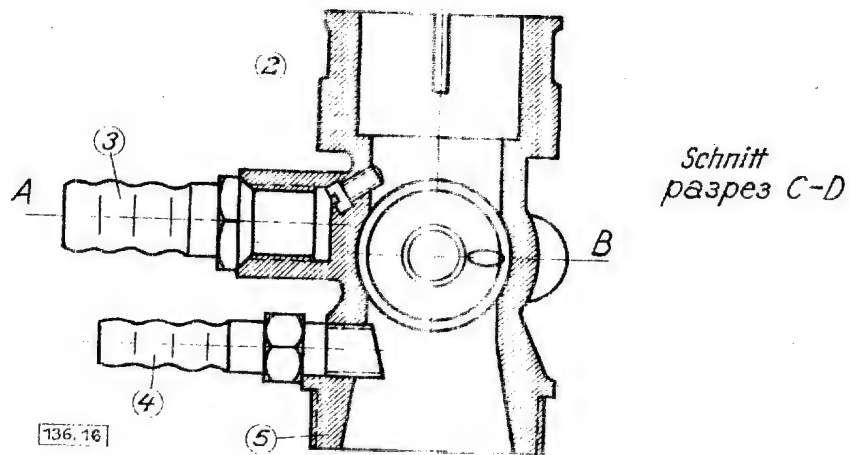
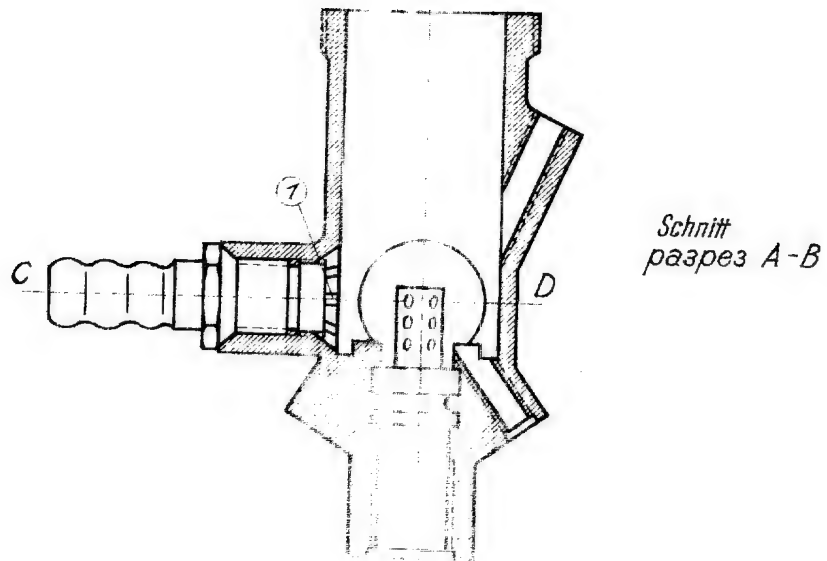
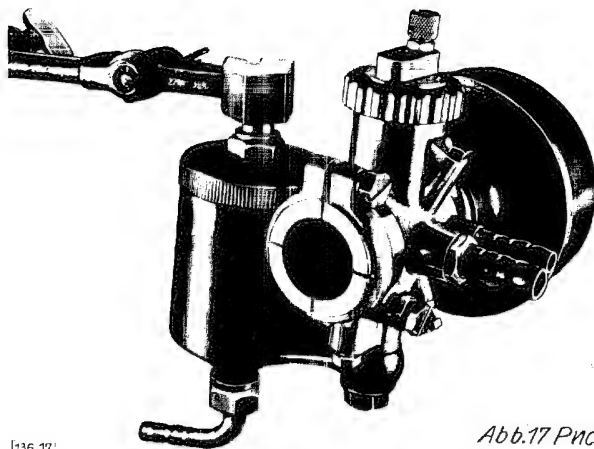


Abb. 16 Рис. 16



[136.17]

*Abb.17 Pnc17*

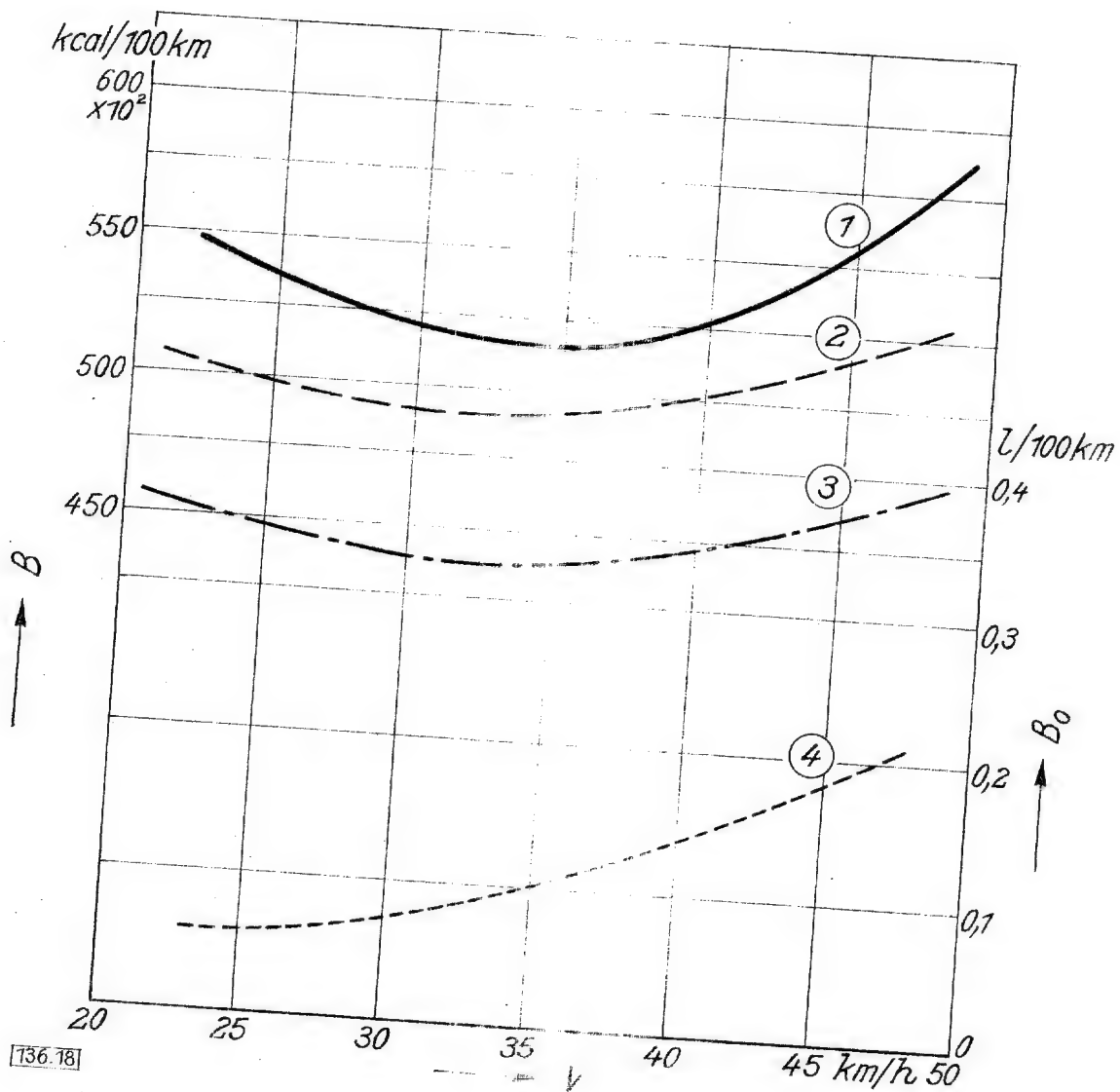












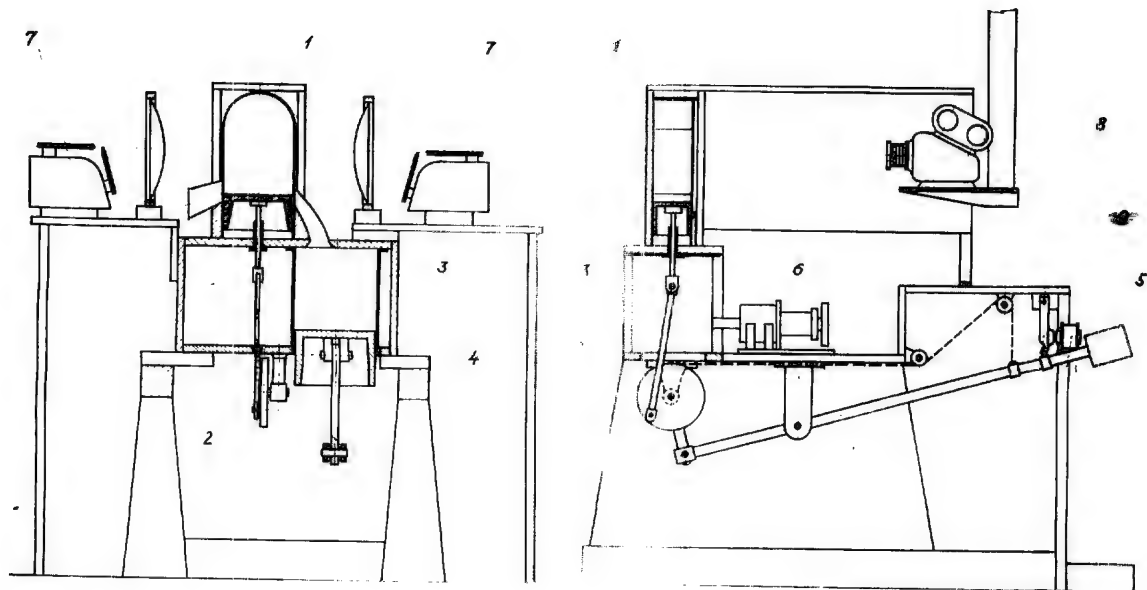


Abb. 18 Рис. 18

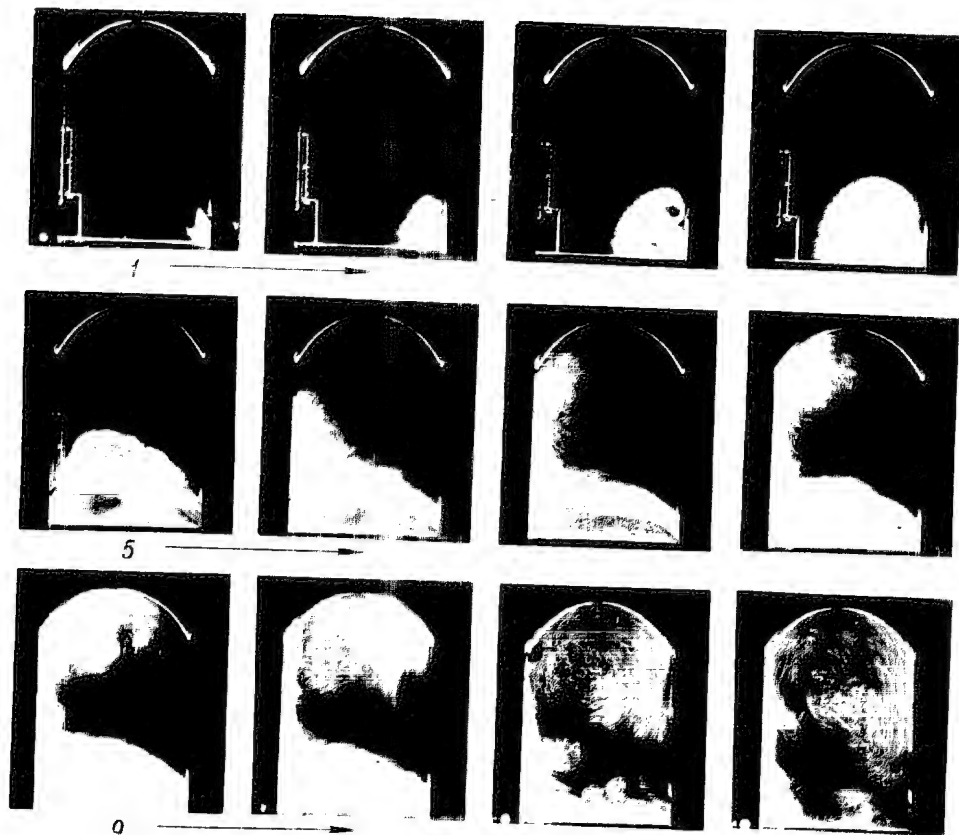
		каналы Schlitze:	после 4000 км. езды Nach 4000 km:	очищены Gereinigt:
правый цилиндр Rechter Zylinder	впуск Einlaß			
	перепуск Überström			
	выпуск Auslaß			
левый цилиндр Linker Zylinder	впуск Einlaß			
	перепуск Überström			
	выпуск Auslaß			

136.19

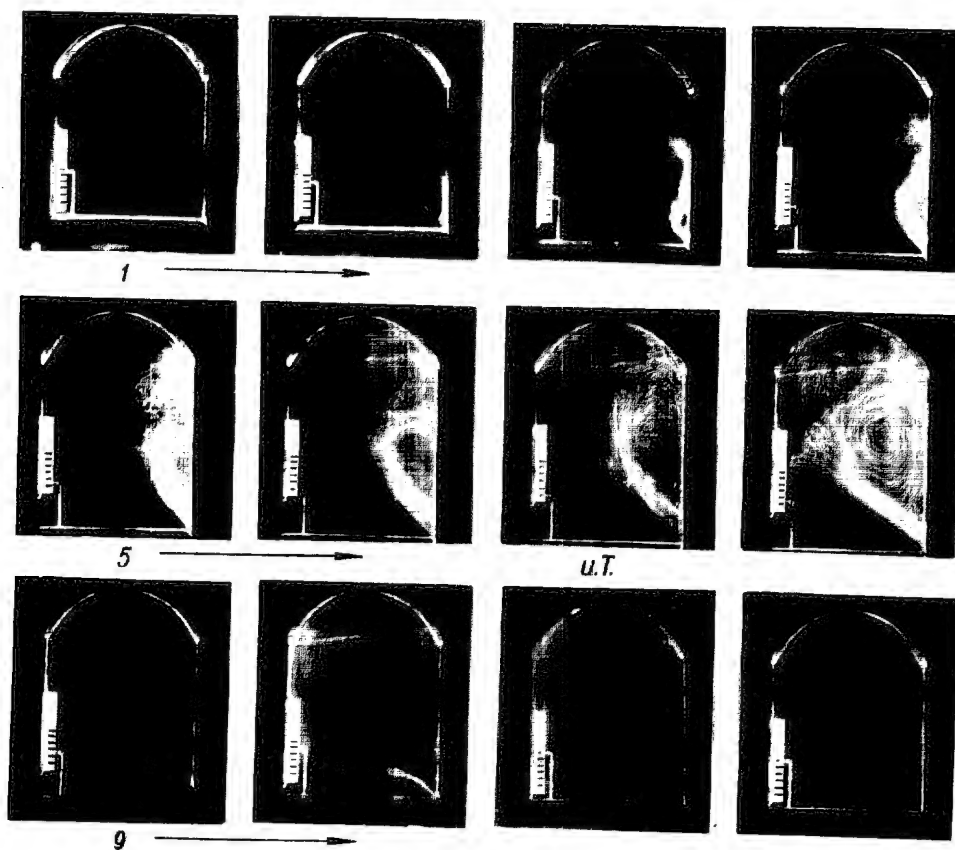
Abb. 19 Рис. 19

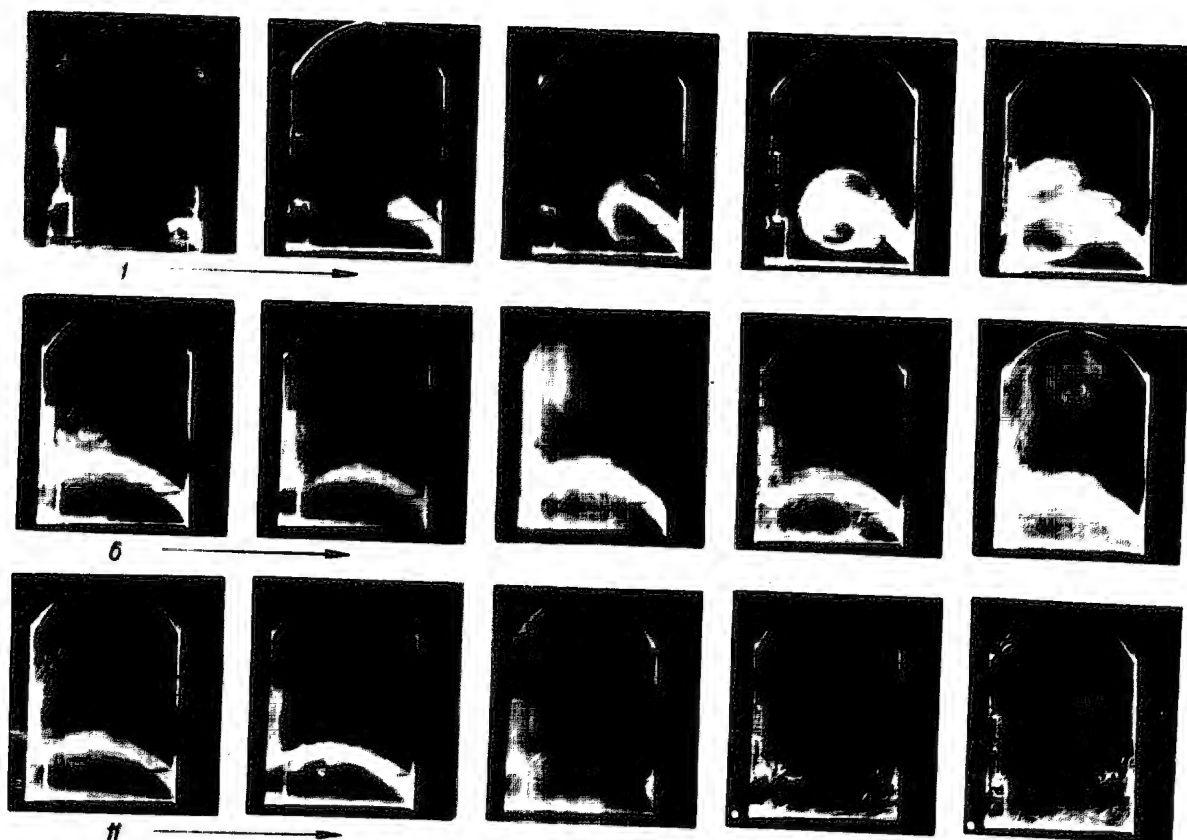


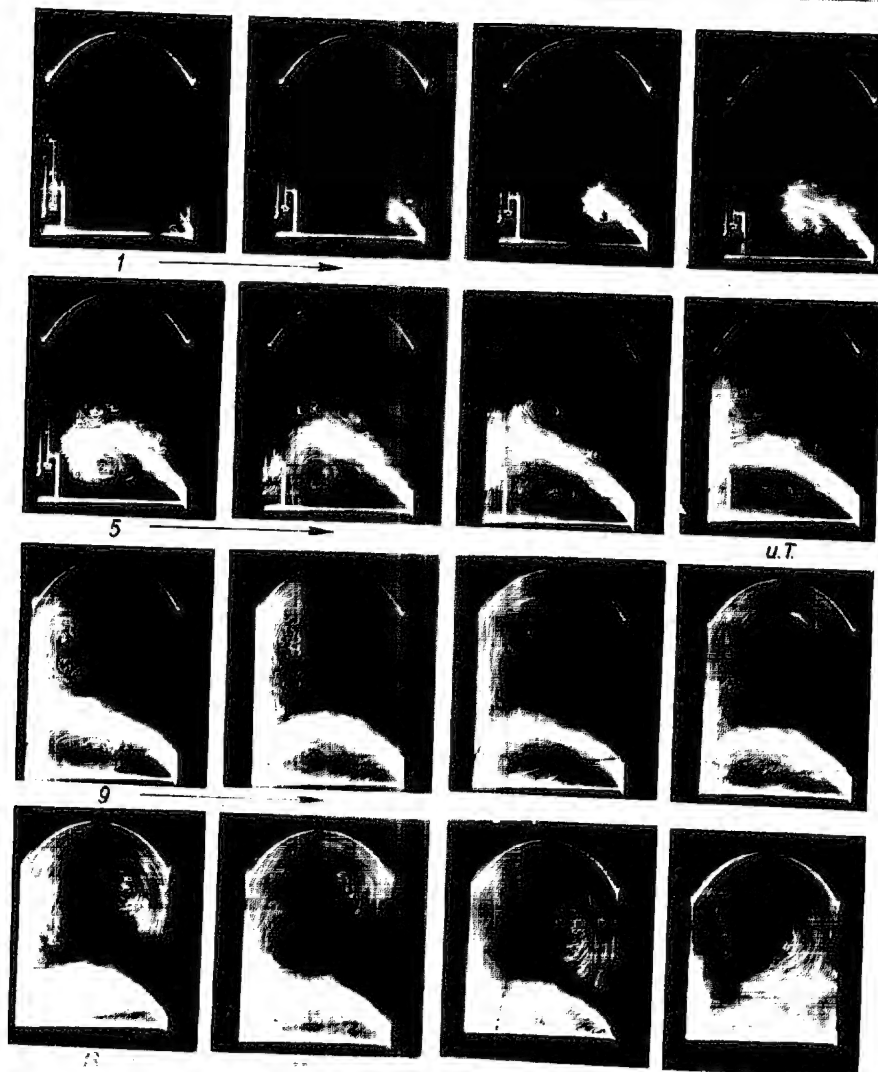


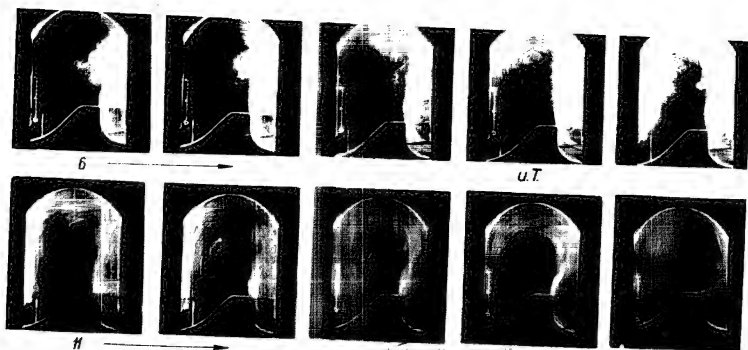
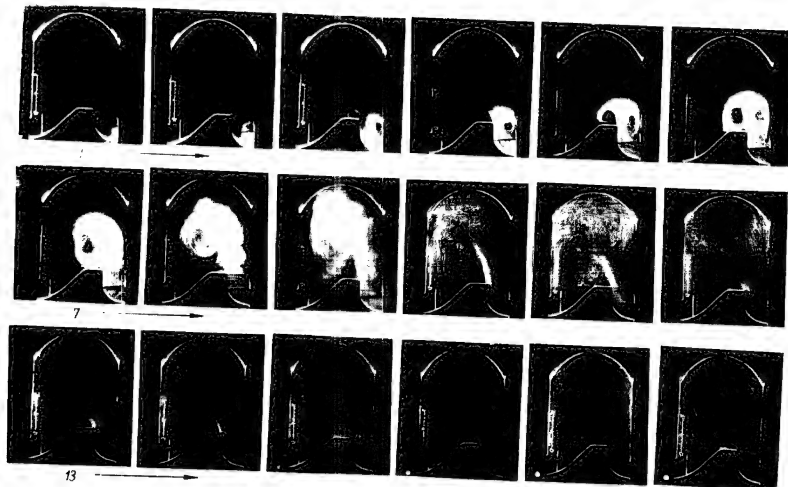


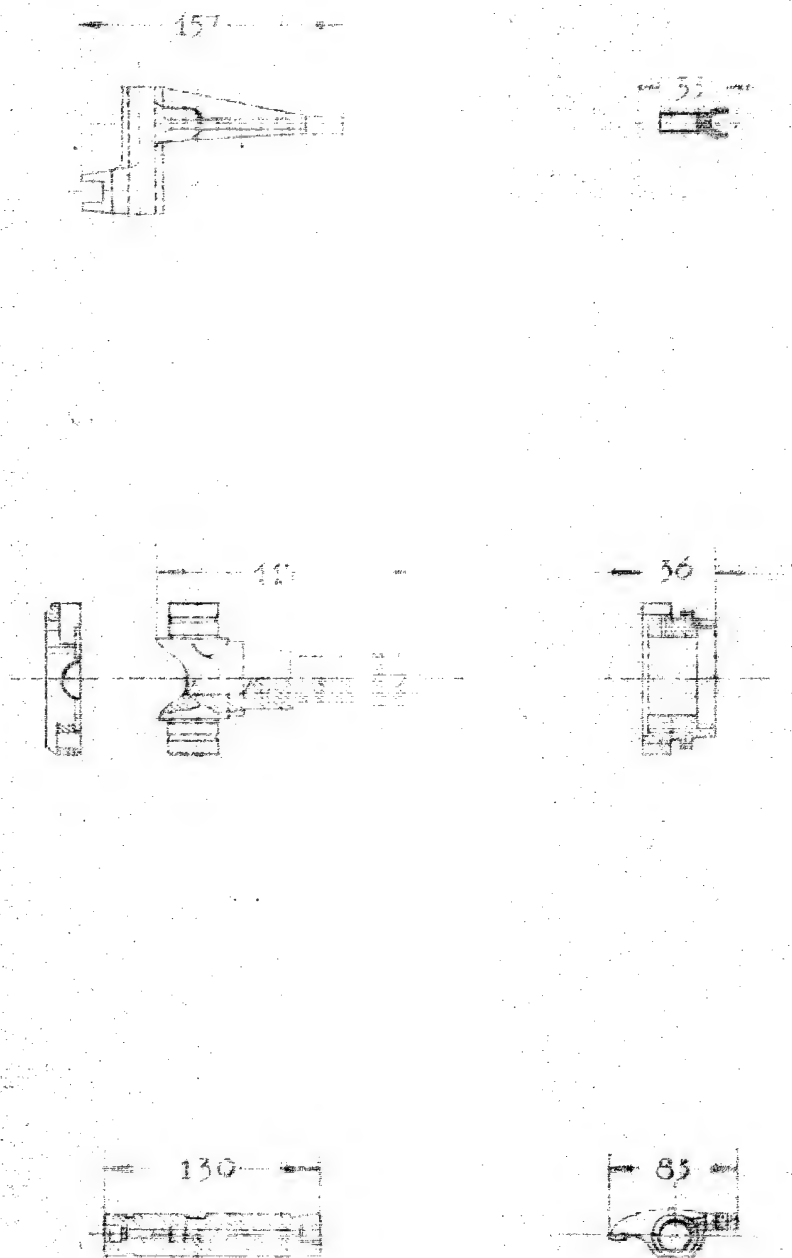
441573





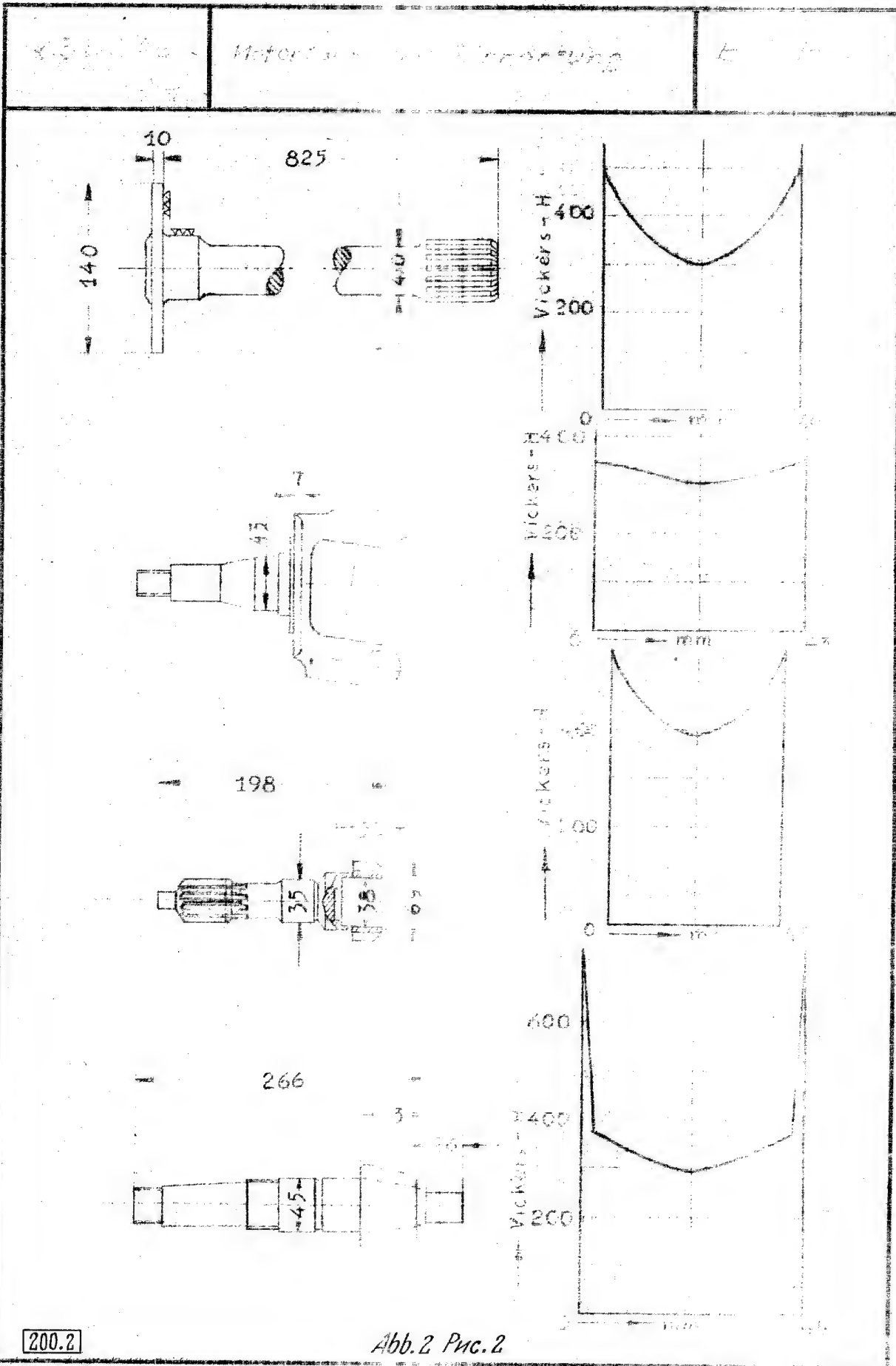






200.1

Abb.1 Рис.1



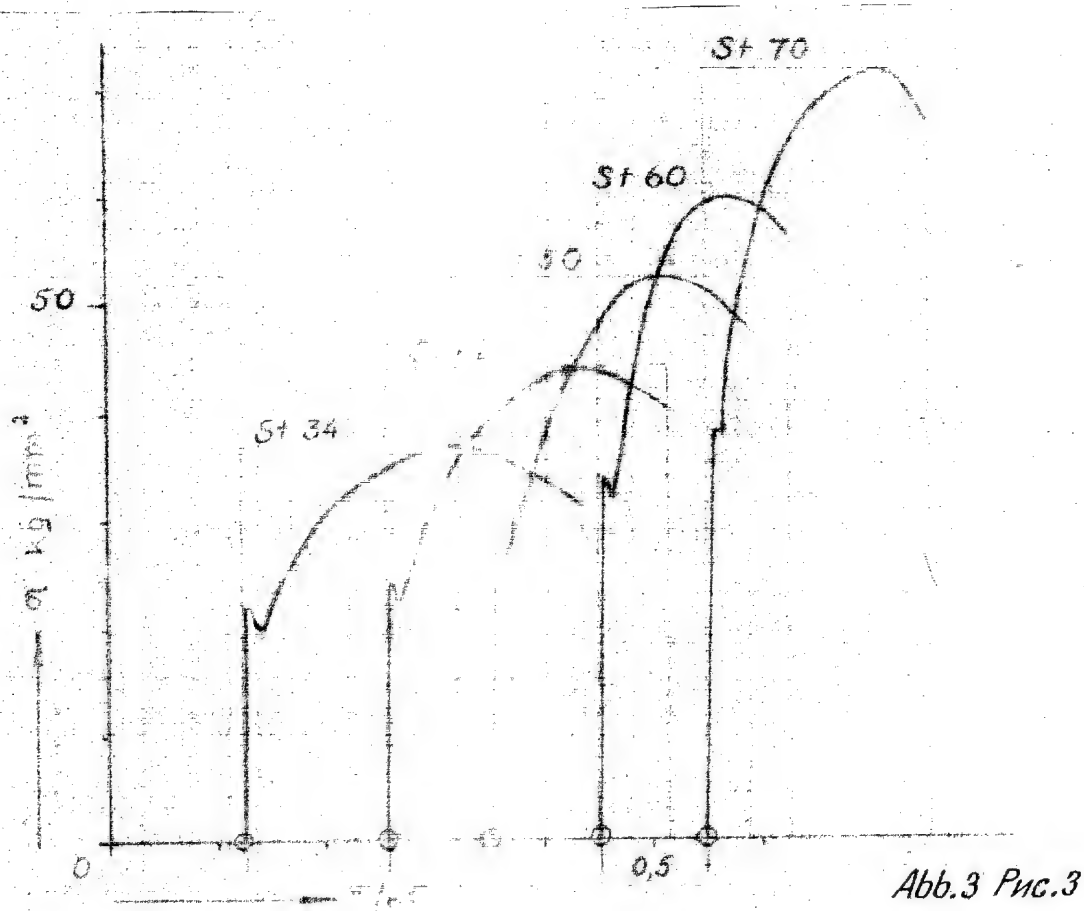


Abb.3 Рис.3

200.3

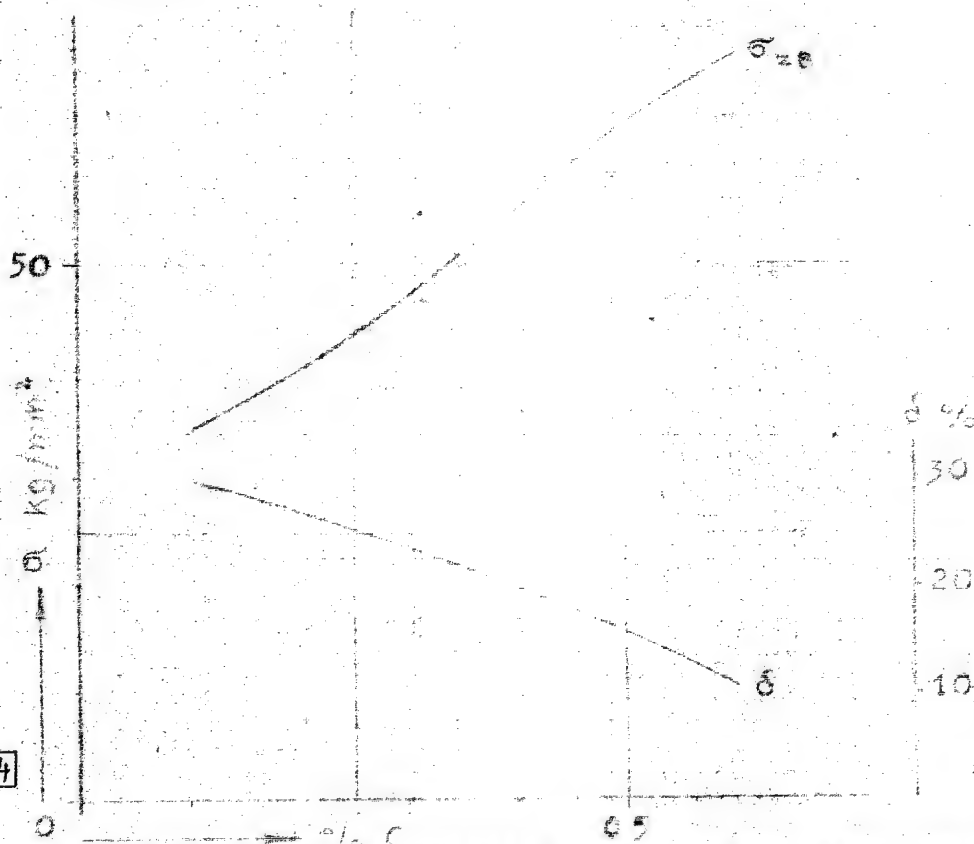


Abb.4 Рис.4

200.4



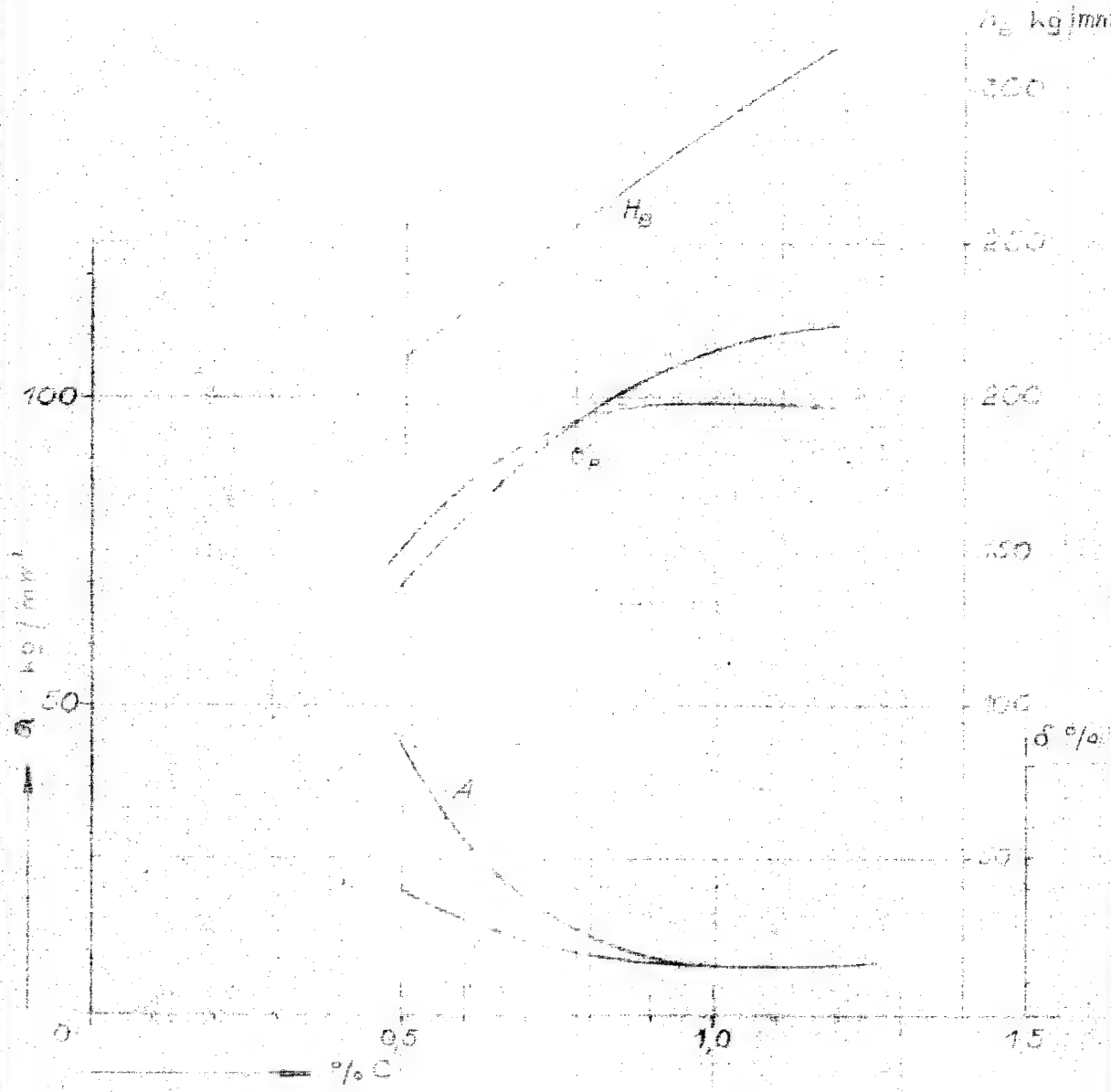
0296

10-13

10-13

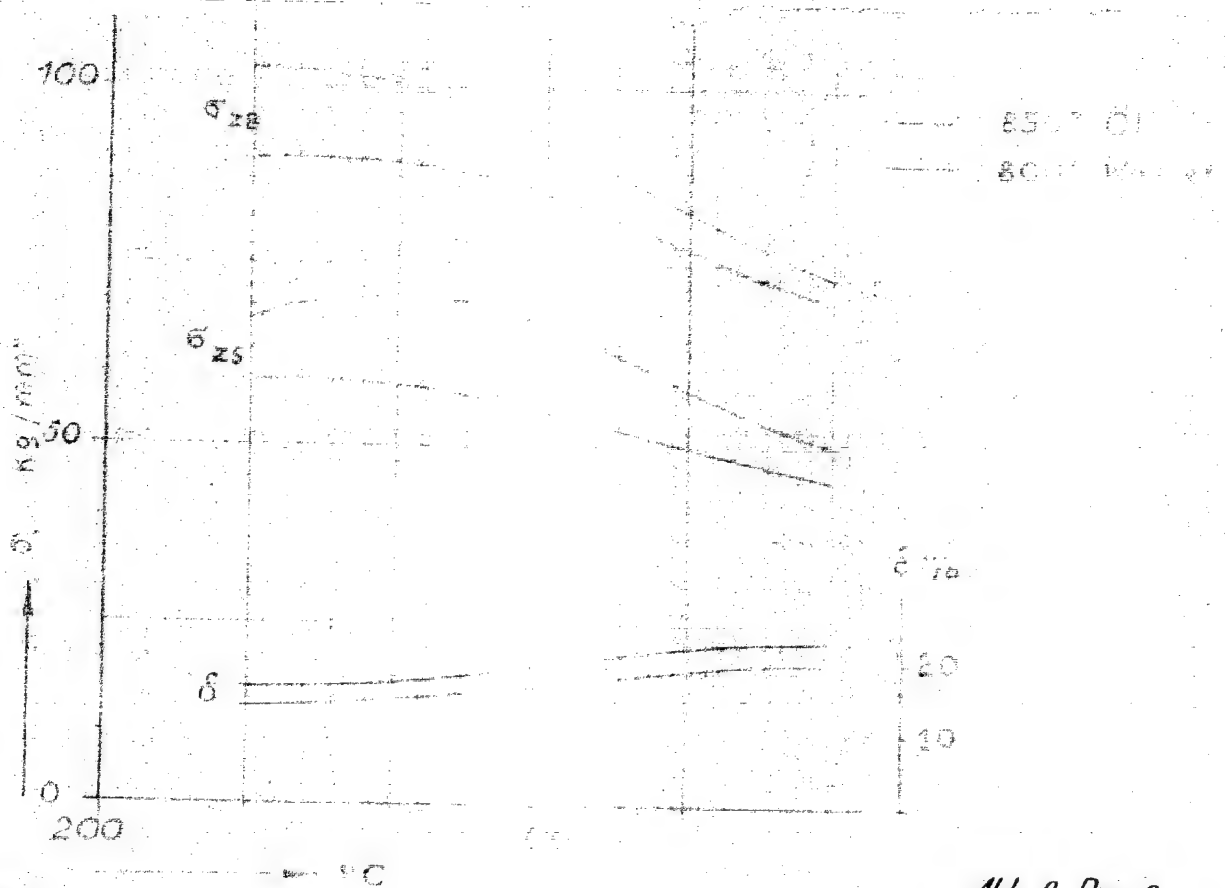
70

5



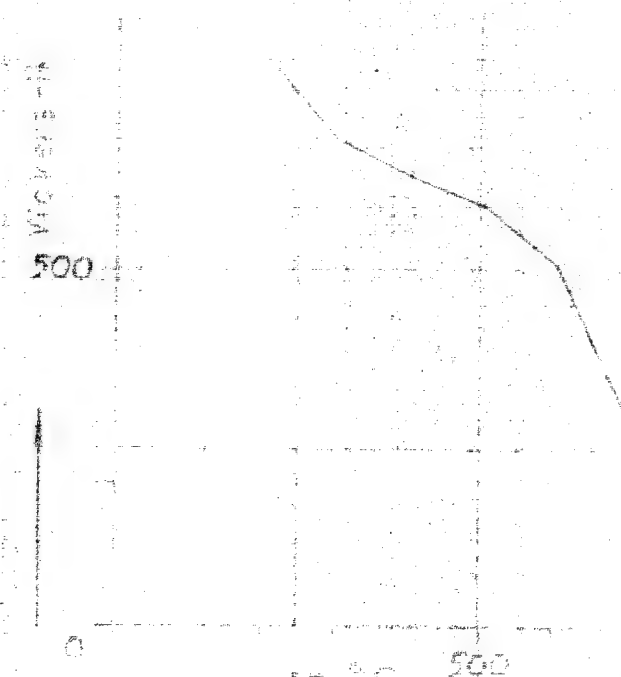
200.5

Abb. 5 Рис. 5



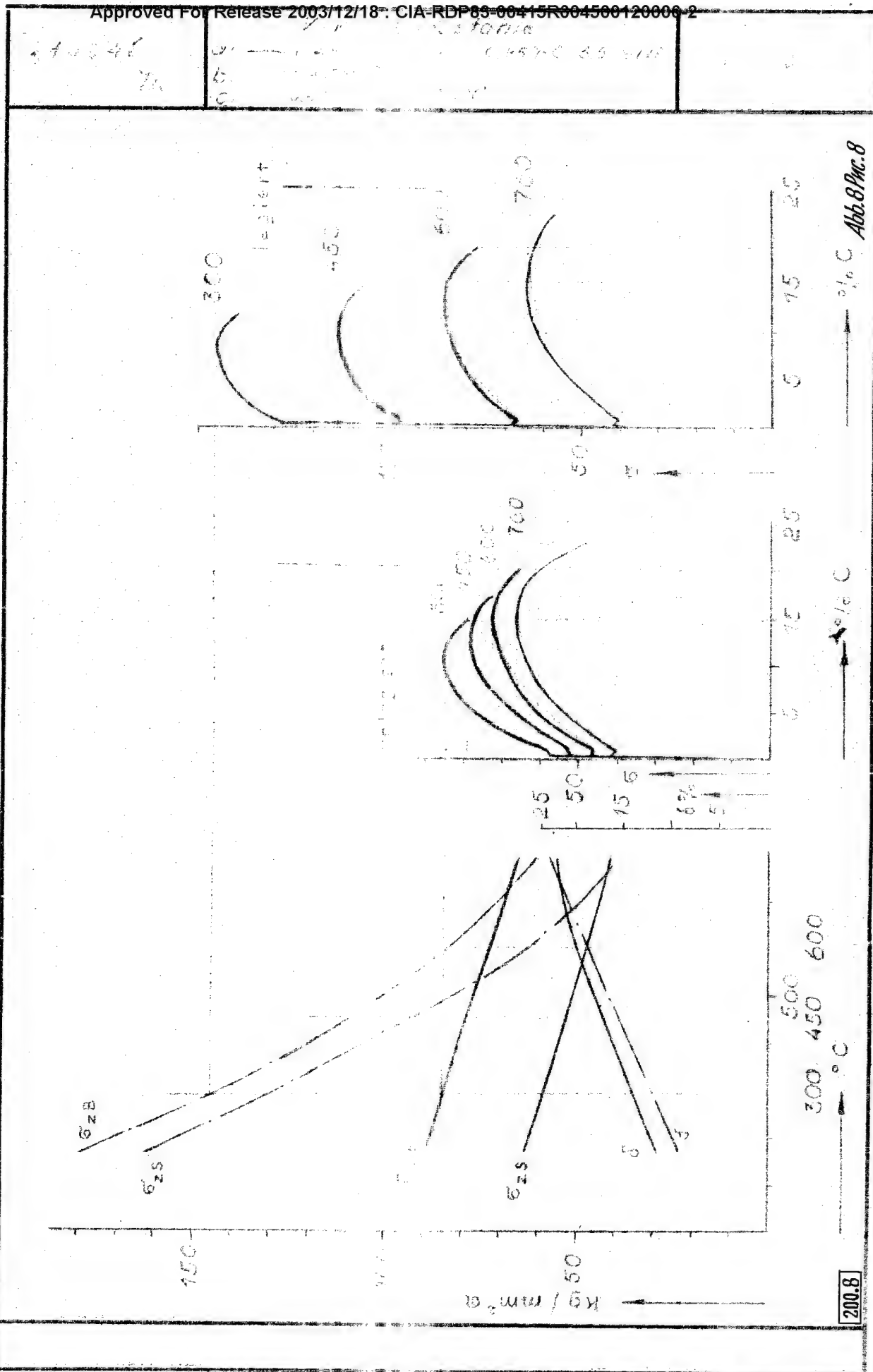
200.6

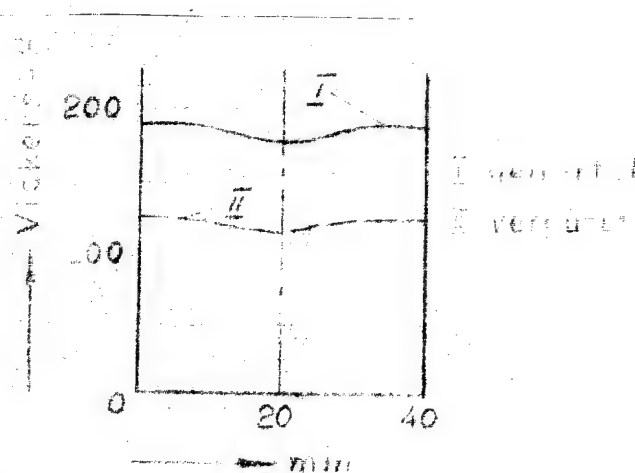
Abb. 6 Рис. 6



200.7

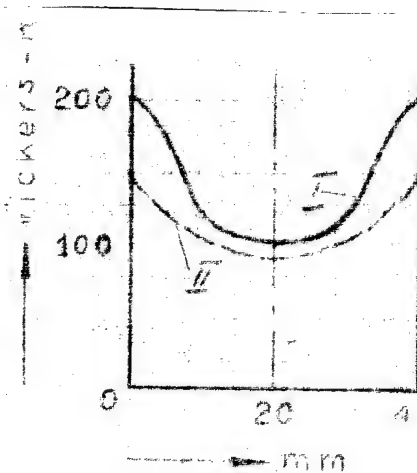
Abb. 7 Рис. 7





VCMo 240

200.9



StC 45.61

Abb.9 Рис.9

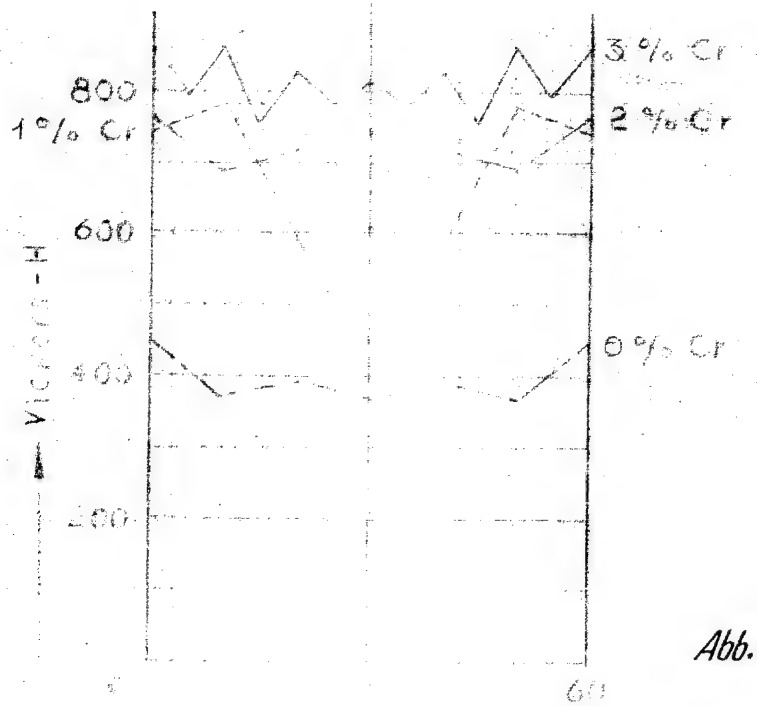


Abb. 10 Рис. 10

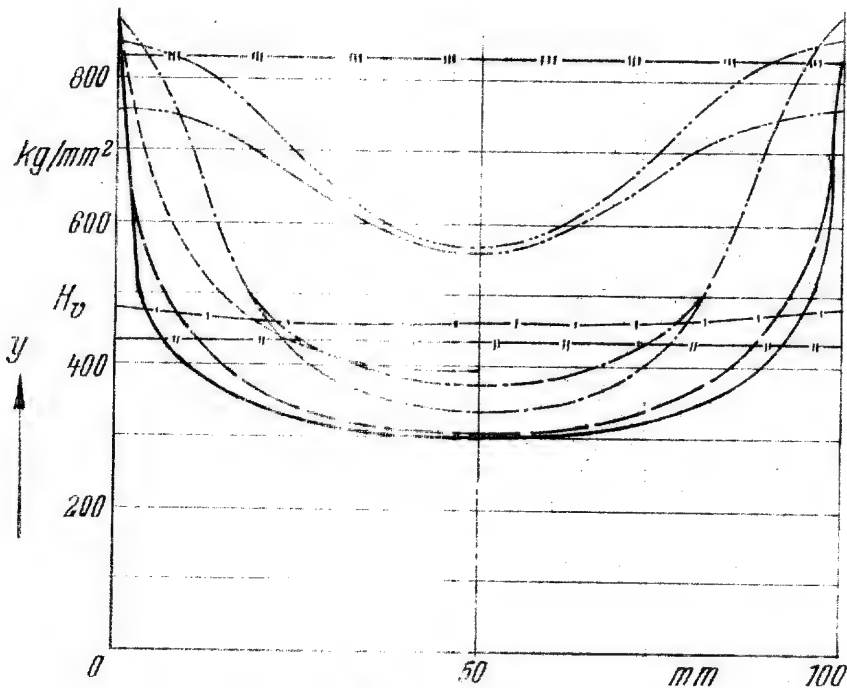


Abb. 11 Рис. 11

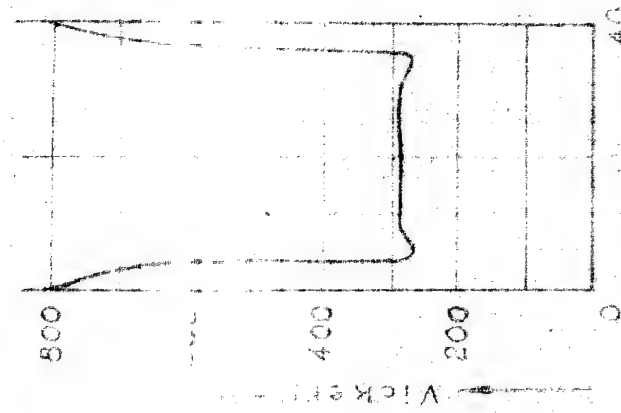
200.12-46

10

14

13

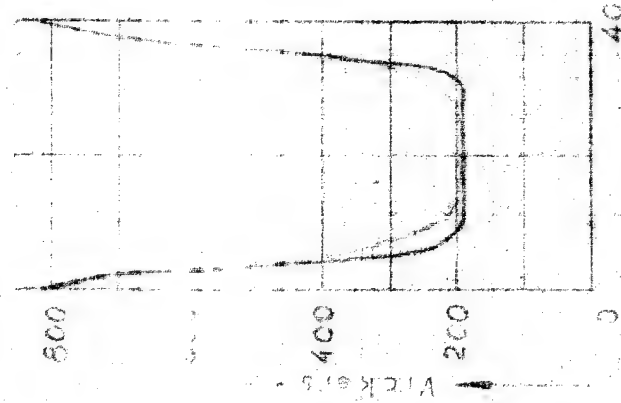
12



Vergütung  
Oberflächenverwertung

Abb. 14 Рис. 14

200.14



Vergütung  
Oberflächenverwertung

Abb. 13 Рис. 13

200.13



Vergütung  
Oberflächenverwertung

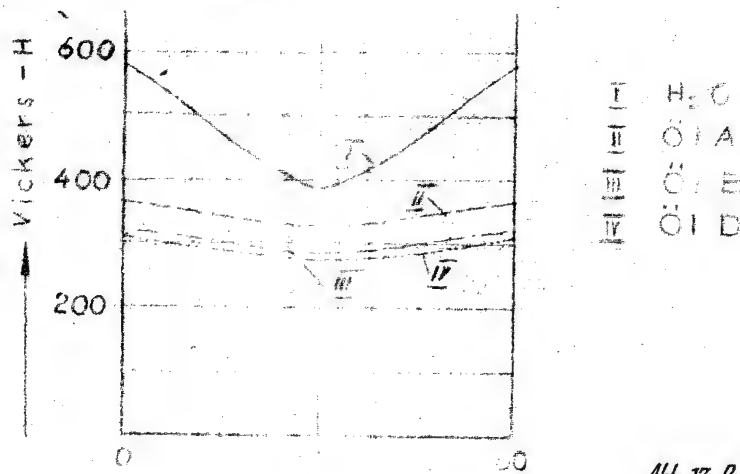
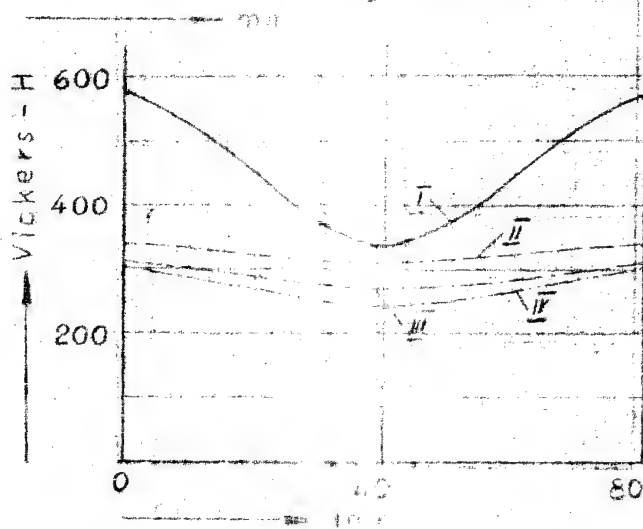
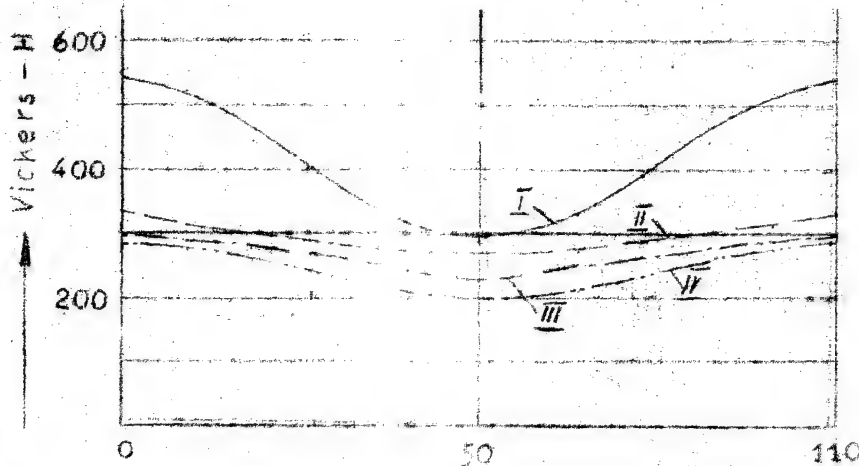
Abb. 12 Рис. 12

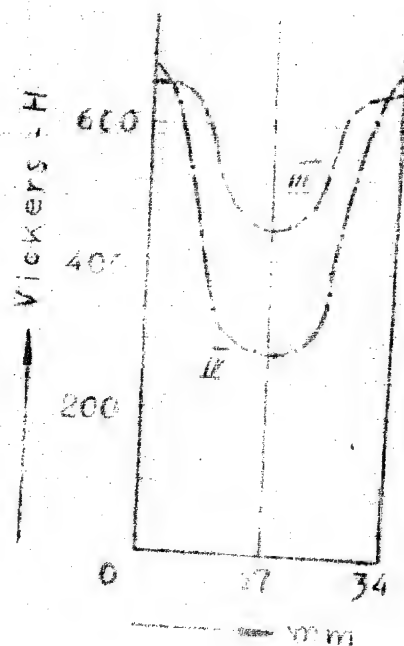
200.12

102,46

Einwirkung von Stahl beim Ab-  
schrecken in  $H_2O(I)$   
Gel. (I), (II), (III), (IV).

31 E



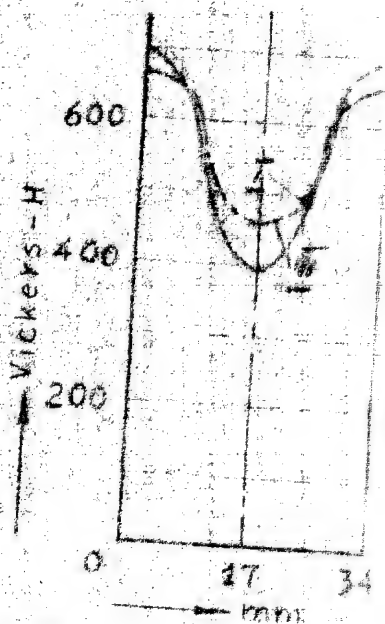


I (Zusammenhang mit der oberen Tokarz-Grenze)

unteren

200.18

Abb. 18 Рис. 18



200.19

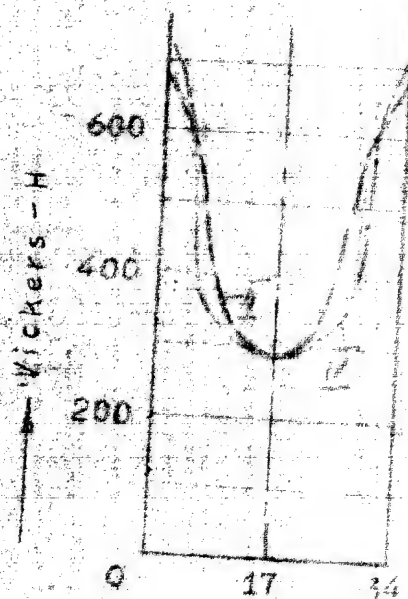
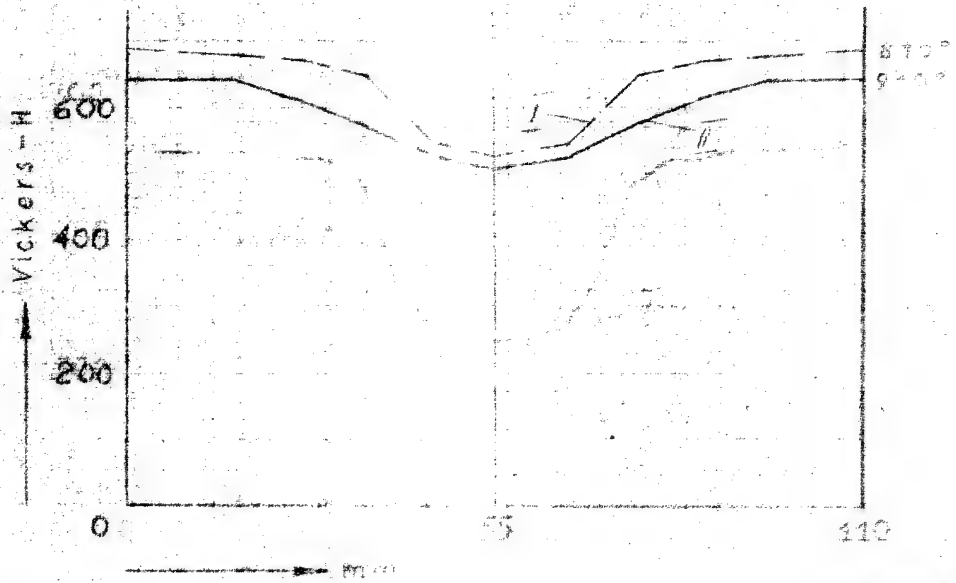


Abb. 19 Рис. 19



10246 Ta	200.20 200.20	200.20 200.20
-------------	------------------	------------------

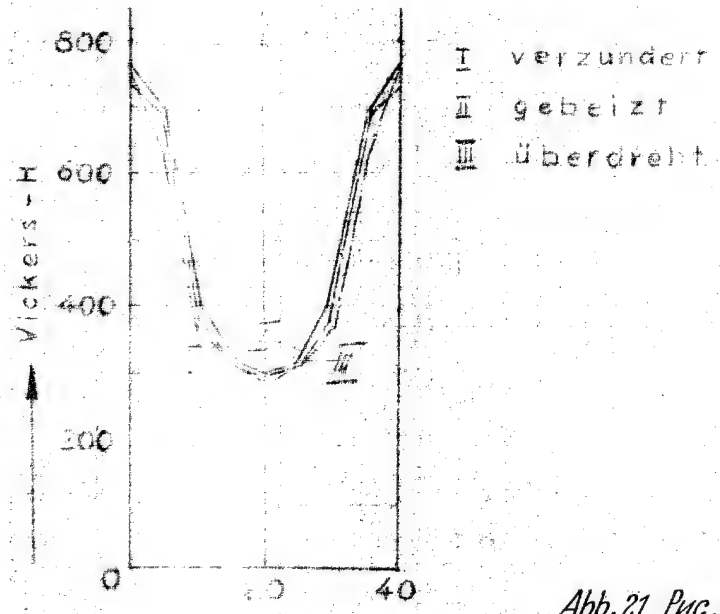
20



200.20

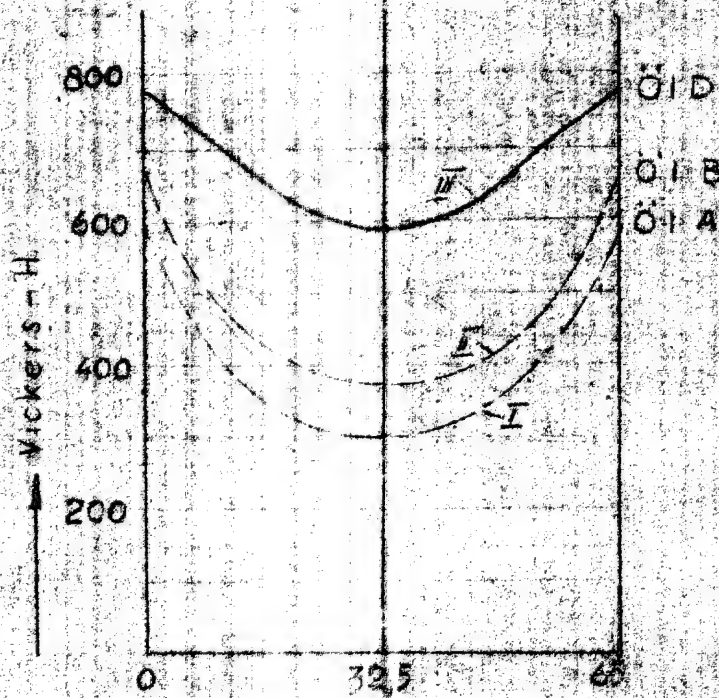
Abb. 20 Psc. 20

21



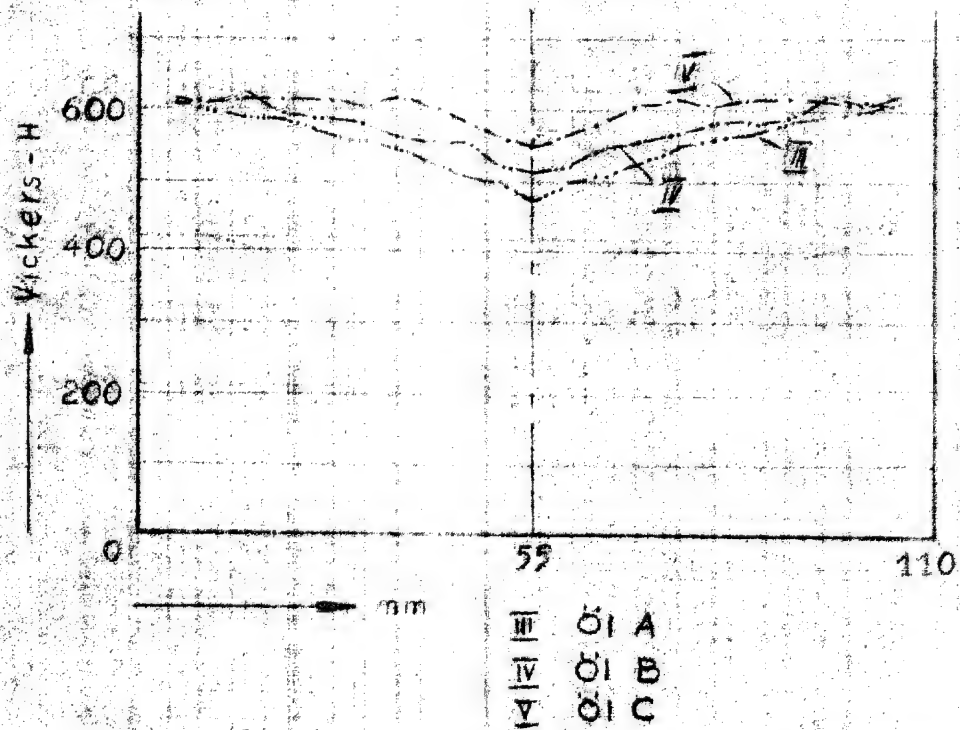
200.21

Abb. 21 Psc. 21



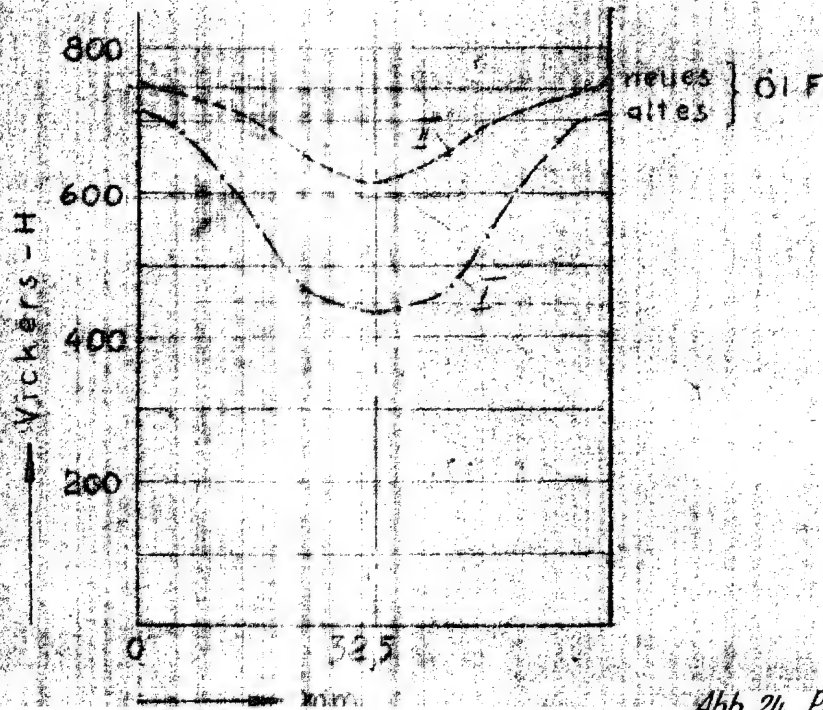
200.22

Abb. 22 Рис. 22



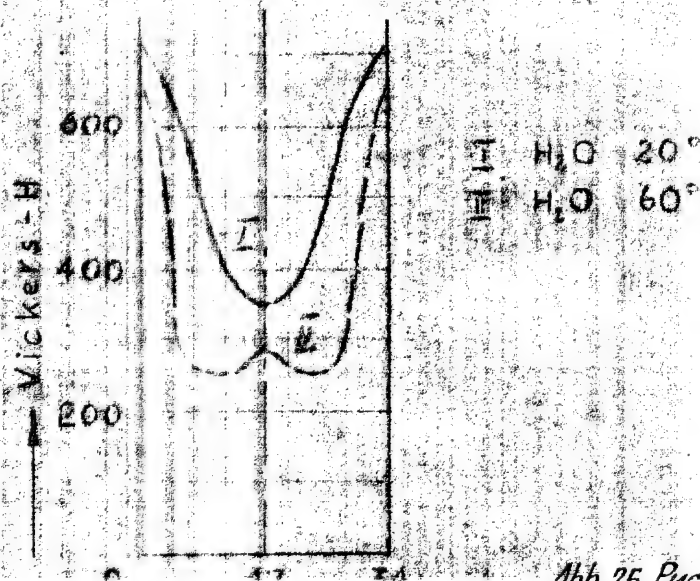
200.23

Abb. 23 Рис. 23



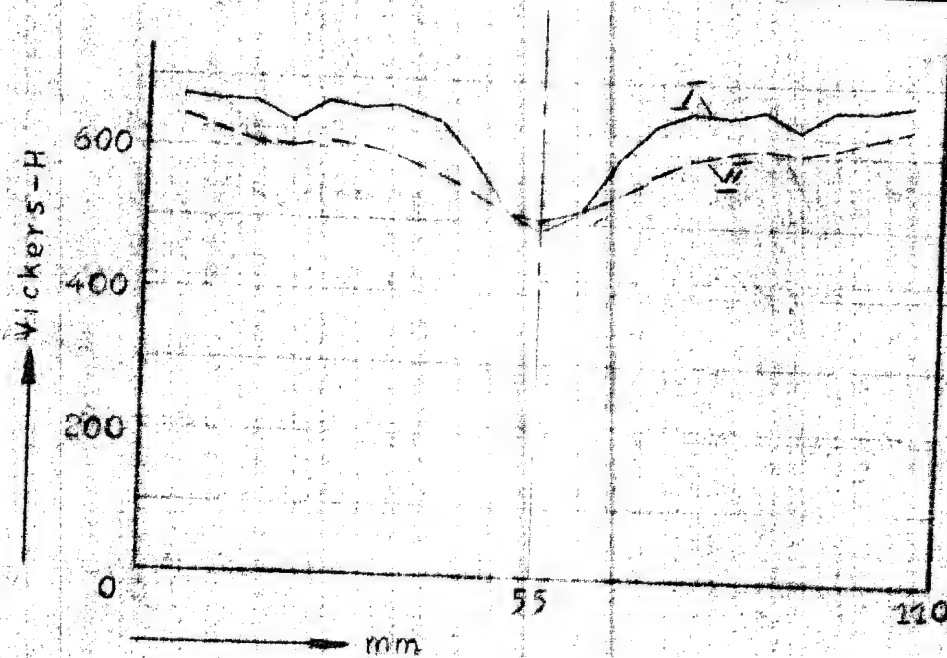
200.24

Abb. 24 Pnc. 24



200.25

Abb. 25 Pnc. 25



200.26

I H<sub>2</sub>O 20°

Abb. 26 Pnc. 26



AS 401-108-7

27



Abb. 27 Рис. 27

28



Abb. 28 Рис. 28

**Berliner Technisch-wissenschaftliches Büro (BTW)**  
**des Ministeriums für Automobil-Industrie (MAI) der UdSSR**  
**Abteilung Gasgeneratoren**

**B e r i c h t s w e r k**

**Stand und Ziele der konstruktiven Entwicklung und der wissenschaftlichen Forschung in Deutschland auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Schleppernmotoren und der Treibstoffe**

- - - - -

**Bericht Nr. 211**

**Themat.Kennziffer IV/4**

**BEITRAG ZUR VERWIRTLICHUNG VON SCHWELKES IN HAUSA**

**BRANDFEUERUNGEN UND DIE ANPASSUNG DER BAULICHEN GESTALTUNG DIESER FEUERSTÄTTEN AN DIE BRANNEIGENSCHAFTEN DES SCHWELKES**

**SCHAFTRA DES SCHWELKES**

**VERFASSEN**

**DIPL.-ING.O. WEIMANN**

**Berichtsbetreuer u.  
Abteilungsleiter**

**Prof.Dr.-Ing.K. Druwe**

**Schriftleiter**

**Dr. H. Wiers**

**Haupt schriftleiter**

**Dipl.-Ing.R. Boye**

**Leiter des Sektors  
Redaktion und Übersetzung**

**Pos.Dr.-Ing.H. Traustel**

Stellungnahme des Berichtsbetreuers

zum Bericht Nr. 211, them. Kennziffer IV/4

**"Beitrag zur Verwendung von Schwelkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstätten an die Brenneigenschaften des Schwelkokes"**

Verfasser: Dipl.-Ing. O. Weimann

Berichtsbetreuer: Prof. Dr.-Ing. R. Drawe

---

Der Bericht stellt so erschöpfend und so richtig, wie es nach dem heutigen Stande unserer Erkenntnisse möglich ist, die Anforderungen zusammen, die an mit Schwelkoks beheizte Hausbrandfeuerungen zu stellen sind, damit alle verbrennungstechnischen Vordinge des Schwelkokes ausgenutzt werden können. Ich vermissen nur den Hinweis, den Weimann selbst an anderer Stelle einmal gebracht hat, daß es zweckmäßig ist, bei der Verfeuerung von Schwelkoks den Schornsteinsug nach oben durch eine festeingebaute unverstellbare Drosselrichtung in Gasabzug zu beschränken. Das soll geschehen, damit Ofenbeschädigungen und Verschlackungen vermieden werden. Schwelkoks ist der einzige feste Brennstoff, bei dem man eine solche Vorrichtung vorteilhaft verwenden kann.

Zu Seite 39 bemerke ich, daß man mit Rost versehene Kachelöfen mit Schwelkoks im Dauerbrand ausgezeichnet und wirtschaftlicher als bei der bisher üblichen Fahrweise betreiben kann - siehe den Bericht Drawe-Kayser, Nr. 3 von Drawe, Nr. 2 von Kayser, S. 61 "Die Bewährung von Steinkohlen- und Braunkohlen-Schwelkoks in Kleinf Feuerungen". S. 43-46 -

Aber selbstverständlich wird man keine Öfen dieser Art neu bauen, wenn von vornherein feststeht, daß sie nur mit Schwelkoks fahren sollen, ihr Vorteil ist immerhin, daß sie mit Schwelkoks, Braunkohlenbriketten und Gasflammkohlen brauchbar betrieben werden können.



Inhalt

von Bericht Nr. 311      2. st. Kennziffer IV/4

**"Beitrag zur Verwendung von Schmelzkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstätten an die Brenneigenschaften des Schmelzkoks"**

Verfasser: Dr. L. v. W. Weimann

In Mahnen der vorliegenden Arbeit werden zunächst die Eigenschaften des Schmelzkoks behandelt, die sich nach Versuchen auf dem Prüfstand und in der Praxis als besonders wichtig und vorteilhaft für seine Verwendung in den Feuerstätten des Hausbrandes erwiesen haben. Anschliessend wird dann näher auf die grundsätzlichen Forderungen, die der Betrieb der Feuerstätten in besonderen bei Verwendung von Schmelzkoks verlangt, eingegangen. Im Hauptteil wird dann ein Bericht über die einzelnen Feuerstätten selbst und ihre bauliche Anpassung an die Eigenschaften des Schmelzkoks gegeben. Bei jedem Teilgebiet wird hier auf die Konstruktion, die als besonders günstig für die Verwendung von Schmelzkoks anzusehen ist, hingewiesen.

Als Ergebnis der Arbeit ist zusammenfassend festzustellen, daß der Schmelzkoks wie kein anderer Brennstoff dazu fähig ist, die Anforderungen auf allen Teilgebieten des Hausbrandes in idealer Weise zu erfüllen. Dank seiner nicht zu übertreffenden günstigen Brenneigenschaften gewährleistet er eine bis dahin nicht erreichte Wirtschaftlichkeit des Brennstoffverbrauchs der Feuerstätten, ferner bietet er der Hausfrau, weil sie die Feuerstätten spielend im Dauerbetrieb halten kann, große Arbeitserleichterung und Bequemlichkeit. Es ist daher damit zu rechnen, daß der stückige Schmelzkoks, wenn er erst einmal in guter Qualität und Klassierung und in ausreichenden Mengen auf dem Markt verfügbar ist, leichter Absatz finden wird und daß für ihn auch gern ein höherer Preis geboten wird, als seinem Heizwert gegenüber anderen Brennstoffen entspricht. Dies wird mit dem beitragen, die Kosten des Schmelzprozesses günstig auf die einzelnen Produkte zu verteilen und damit die Treibstoffgewinnung durch Schmelzung zu fördern.



Inhaltsverzeichnis

zum Bericht Nr. 211 Themat. Kennziffer IV/4

"Beitrag zur Verwendung von Schmelzkoks in Hausbrandfeuerungen und die Anpassung der baulichen Gestaltung dieser Feuerstätten an die Brenneigenschaften des Schmelzkokes"

Verfasser: Dipl.-Ing.O. Weimann

	<u>Seite</u>
A. Grundsätzliche konstruktive Anforderungen an Feuerstätten für Schmelzkoks . . . . .	1
I. Die Brenneigenschaften des Schmelzkokes . . . . .	1
II. Wichtige Forderungen für den Betrieb der Feuerstätten . . . . .	1
a. Die Regelbarkeit des Abbrandes . . . . .	2
b. Einfache Bedienung . . . . .	5
c. Stubenreinheit . . . . .	6
B. Die bauliche Gestaltung der Feuerstätten . . . . .	7
I. Die Kochherde mit offener Herdplatte oder geschlossenem Kochraum . . . . .	7
a. Der Herd mit offener Kochplatte . . . . .	11
Kostgröße und Ausführung . . . . .	11
Feuerraumhöhe . . . . .	13
Zugquerschnitte bei Umbrand- und Mundzugherden . . . . .	14
Genügende und gleichmäßige Erwärmung des Bratofens . . . . .	15
Dichte Ausführung des Herdes unterhalb der Feuerung . . . . .	19
Ausführung und Bemessung des Luftregelorgans . . . . .	21
Dichte Ausführung des Herdes oberhalb der Feuerung . . . . .	21
Maßnahmen für Stubenreinheit . . . . .	24
b. Der Herd mit geschlossenem Kochraum (Schrankherd) . . . . .	27
Grundsätzliches zum Grudeherd . . . . .	27
Allgemeine Vorteile des Schrankherdes . . . . .	28
Material und Ausführung des Herdmantels . . . . .	29
Kost und Feuerung . . . . .	30
Zugführung und Zugquerschnitte . . . . .	31
Ausführung des Kochraumes . . . . .	32
Weitere Konstruktionsteile . . . . .	34
II. Der Badeofen . . . . .	34
a. Die Eignung des mit Schmelzkoks befeuerten Badeofens für die ständige Warmwasserbereitung . . . . .	34
b. Bauarten der Badeöfen und Kleinwarmwasserbereiter . . . . .	36
c. Bauliche Einzelheiten . . . . .	37

- iv -

	<u>Seite</u>
Restgröße und Ausföhrung . . . . .	37
Dichtheit der Ausföhrung . . . . .	38
Vergrößerung der Heizflächen . . . . .	39
d. Kombination der Wasserdampferbereitung mit anderen Feuerstätten . . . . .	39
Nachgeschalteter Heizkessel im Herd mit offener Kochplatte . . . . .	40
Heizschlange im Herd mit geschlossenem Kochraum . . . . .	41
e. Versorgung mehrerer Zapfstellen von Indeeöfen mit . . . . .	42
Anlagen mit Dreianschlussbahn . . . . .	42
Anlagen mit Schmelzkugelgefäß oder Reduzier- ventil . . . . .	43
Anwendbarkeit dieser Anlagen und Vorteile des Schmelzkessels . . . . .	43
III. Die Hausheizöfen . . . . .	44
a. Aufgaben der Öfen und ihre Haupttypen . . . . .	44
Speicheröfen und Dauerbrandöfen . . . . .	45
Einigung des Schmelzkessels . . . . .	45
b. Die eisernen Dauerbrandöfen . . . . .	47
Dauert der Durchbrand- und Unterbrandöfen . . . . .	47
Einigung für den Schmelzkessel . . . . .	48
c. Bauliche Einzelheiten beim Durchbrandöfen . . . . .	49
Größe und Form des Kessels, Stahlplatte . . . . .	49
Zugföhrung . . . . .	51
Dichte Ausföhrung . . . . .	51
Maßnahmen zur Abgasreinigung . . . . .	52
d. Bauliche Einzelheiten bei Unterbrandöfen . . . . .	52
Unterbrandöfen für Anthrazit . . . . .	52
Unterbrandöfen für verschiedene Brennstoffe . . . . .	53
e. Die Dauerbrandeinzelheiten . . . . .	53
f. Die keramischen Dauerbrandöfen . . . . .	54
C. Zusammenfassung . . . . .	55

## A. Grundsätzliche konstruktive Anforderungen an

### Feuerstätten für Schmelzkohle

#### I. Die Brenneigenschaften

Der Schmelzkohle zeichnet sich gegenüber den anderen im Hausbrand gebräuchlichen Brennstoffen durch folgende Eigenschaften aus:

1. Teertfreiheit.
2. ausgezeichnete Zündfähigkeit (niedriger Zündpunkt),
3. ausgezeichnete Feuerbrandfähigkeit,
4. schlackenlose Verbrennung.

Deshalb wird mit diesem Brennstoff in den Händen der Hausfrau oder sonstiger angeschulter Personen keine Fehlgriffe möglich, die eine Vergasung des Brennstoffes oder einen vorzeitigen Verschleiß der Feuerstätten hervorrufen. Allerdings hängt dies auch wesentlich von der Konstruktion der Feuerung ab. Eine den besonderen Verbrennungseigenschaften dieses neuen Brennstoffes besser angepasste Feuerstätte wird in praktischen Hausbetrieb wesentlich günstigere Ergebnisse bringen als eine andere, die in ihren primitiven herkömmlichen Aufbau auch sonst schon ihren Zweck nur unvollkommen erfüllt.

#### II. Wichtige Forderungen für den Betrieb der Feuerstätten

Neben dem primären Ziel, den Brennstoff möglichst gut auszunutzen, müssen die Hauslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe noch folgende Bedingungen erfüllen:

1. Gute Regelbarkeit. Bei Voll- und Teillast wie auch bei ausgesprochenen Winkeln des Feuers während der Betriebspausen sollen die Feuerstätten mit einem guten, etwa gleichbleibenden Wirkungsgrad betrieben

werden können.

2. Einfache Bedienung. An die Aufmerksamkeit des Bedienungspersonals dürfen keine hohen Ansprüche gestellt werden.
3. Staubreinheit. Minimaler Bedienungsaufwand für die Reinigung zu erzielen.

Diese Forderungen wurden in der früheren Zeit von den Herstellern nur wenig beachtet, oft sogar ganz vernachlässigt. Ihre Erfüllung ist aber von ausschlaggebender Bedeutung, weil sie die Liebe des Bedienenden zu der jeweils benutzten Feuerstätte erweckt, wodurch unmittelbar auch der Brennstoffverbrauch beeinflusst wird. Es ist ein unbestrittenes Verdienst der brennstoffschaffenden Industrie - insbesondere der Braunkohlenbergbau, der seinen Hauptabsatz von jeher in Hausbrand hatte - , daß sie diese Forderungen erstallt, erhebt und dann auch in sich immer mehr vertiefender Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen durchsetzte. Es ist zu erwarten, in Rahmen dieser Arbeit kurz darauf hinzuweisen, weil diese Erkenntnisse auch bei der konstruktiven Gestaltung der Feuerstätten für Schmelzkoks galten.

#### a. Die Regelbarkeit des Abbrandes

Die Regelbarkeit hängt ab von der dichten Ausführung der Feuerstätten. Auch die sorgfältigsten durchgebildeten Regelorganen versagen, wenn sich undichte Stellen an Stoßfugen usw. Falschluf in die Feuerung und die Heizflüge eindringt. Abgesehen von der Verschlechterung der Wirkungsgrade, die durch die Verdünnung der Rauchgase und die damit verbundene Senkung der Rauchgastemperatur eintritt, ist denn der Abbrand in hohem Maße von dem Grad der Undichtigkeit abhängig. Außerdem ist er starker Zufälligkeiten - wie Tageschwankungen infolge äußerer Witterungseinflüsse, Änderungen des Strömungszustandes infolge von Veraschung des Brennstoffbettes usw. dgl. - ausgesetzt. Besonders

- 2 -

Kress anheben sich die Hängel bei schwacher Last und beim Dauerbrand schwerer an. Manche Brennstoffe, vor allem der Hochtemperaturkoks, sind gegenüber Undichtheiten der Feuerstätten, wenn sie nicht gar zu groß sind, verhältnismäßig unempfindlich. Anders steht es jedoch mit den stark reaktionsfähigen Brennstoffen, zu denen auch der Schmelzkoks zu rechnen ist. Bei ihnen besteht die Gefahr, daß sie zu rasch abstromen und daß infolgedessen in kurzer Zeit eine damit große Strommenge frei wird, so daß die Feuerungen verschlucken und zerstört werden.

Die Schädlichkeit undichter Stellen an den Feuerstätten ist je nach ihrer Lage verschieden zu bewerten. In erster Linie ist die absolute Dichtigkeit des Achenraumes, durch den in der Regel die Verbrennungsluft unter dem Kost geführt wird, zu achten. Undichtheiten an dieser Stelle wirken sich unmittelbar auf die Regelfähigkeit aus, weil die hier eintretende Luft in voller Menge dem Brennstoffbett durchströmt und daher die Intensität der Verbrennung mitbestimmt. Von mittelbarem Einfluss ist die Falschluff, die oberhalb des Brennstoffbettes in die Feuerung und die Heizröhre eingesaugt wird. Sie wirkt sich auf die Regelfähigkeit besonders bei schwachem Schornsteinzug ungünstig aus, weil die Luft sich stets dem Weg des geringsten Widerstandes sucht und damit die Gefahr besteht, daß die Hauptmenge der Luft hinter den Feuerraum durch die undichten Stellen eingesaugt wird und im Feuerraum selbst Luftmangel herrscht. Auf Einzelheiten, wie diese Forderungen bei den verschiedenen Feuerstätten gelöst werden können, wird später näher eingegangen.

Besonders ist auf die Einstellung des Regelorgans für die Frischluftzufuhr zu achten, damit der Verlauf des Schmelzkokes, nämlich seine Dauerbrandfähigkeit, voll ausgenutzt werden kann. Hierfür soll der Anschluß des Regelorgans, das aus einer Schieber, Ventile oder Klappe aus-



gebildet wird, bei dieser Öffnung so groß sein, daß auch bei der zulässigen Verengung die erforderliche Verbrennungsluftmenge ohne unzulässig hohen Druckverlust hindurchströmt. Der Querschnitt ist daher so zu bemessen, daß er selbst bei einer schwachen Schornsteinwind ausreicht, der z. B. beim Anheizen aus dem kalten Zustand häufig unter 0,1 m/s liegt. Auf jeden Fall soll vorgesehen werden, daß die Aschenabfuhr zum schnelleren Abgang bringen des Feuers nicht zuheizen geöffnet werden muß. Dadurch wird nämlich die vielfach auftretende Asche unterstützt, auch während des weiteren Betriebes die Aschenabfuhr offen zu halten, die bringt neben außerordentlicher Brennstoffvergeudung die Gefahr mit sich, daß die Feuerstätte infolge der Überanstrengung zerstört wird. Wegen der hohen Reaktionsfähigkeit des Schmelzkokes und seiner daraus herrührenden Neigung zum "Durchgehen" muß dieser Zusammenhang bei der konstruktiven Durchbildung entsprechend berücksichtigt werden. Umgekehrt ist beim Schwachlastbetrieb eine gute Selbstregelung der Verbrennungsluftmenge unbedingt erforderlich, damit ein möglichst langer Dauerbrand, für den ja der Schmelzkoks die besten Voraussetzungen bietet, erzielt werden kann. Ein Regler (Ventil, Rosette oder d. l.), dessen freier Querschnitt proportional dem Öffnungsgrad veränderlich ist, genügt nicht (s. Abb. 1 a). Es ist vielmehr erforderlich, daß im unteren Bereich die Begrenzungskante der Regleröffnung parabelförmig verläuft (s. Abb. 1 b und 1 c). Strömungsmessungen, bei denen jeweils die "gleichwertige Querschnittsfläche" errechnet wurde, zeigten nämlich, daß schon ganz geringe Vergrößerungen des Luftquerschnitts die durchströmende Luftmenge erheblich vermindern und daß das Feuer nur mit Erfolg geregelt werden kann, wenn der Regler gemäß Abb. 1 b und 1 c ausgebildet wird. Durch die Drosselung des Reglerorgans wird ein zusätzlicher Widerstand in der Luftweg gelegt, der nur überwunden werden kann, wenn an anderer

Stelle hinter ihn Einheiten vorhanden sind, die seine Wirkung wieder aufheben. Bei der Verfeuerung von Schmelzkoks ist dieser Zustand bedeutsam, weil man anstrebt, in Betriebespausen die Glut und damit die betriebsbereitschaft der Feuerstätte aufrecht zu erhalten, ohne daß ein unnötiger Verbrauch eintritt.

#### b. Einfache Bedienung

Der Forderung nach möglichst einfacher Bedienung kommt der Schmelzkoks in Gegensatz zu den bituminösen Brennstoffen durch seine Eigenschaften von Haus aus schon entgegen. Während bei diesen der Luftbedarf in den einzelnen Verbrennungsstufen so verschieden ist, daß es nicht immer möglich ist, die Einstellung der Feuerstätte dem jeweiligen Koksbedarf anzupassen, kann die Intensität des Schmelzkoksfeuers während so gut geregelt werden wie die Flamme eines Brenners. Daraus ergibt sich für den Konstrukteur die Forderung, den Bedienungsmechanismus der Feuerstätte so einfach zu gestalten, daß sich die Arbeit der Hausfrau nur auf wenige Handgriffe beschränkt. Es sind dies das Regeln der Luftmenge mit dem Luftregelorgan, das gelegentlichen Entfernen der Asche von Asche und die Betätigung der Anheiz- oder Umstellklappe. Selbst der letztgenannte Handgriff ist, so selbstverständlich er auch erscheinen mag, schon unerwünscht, weil er häufig vergessen wird; eine genügende Ausnutzung der Rauchgaswärme ist dann die Folge. Anheizklappen, die zusätzliche Quellen für Unrichtigkeiten innerhalb der Rauchzüge darstellen, sind daher nur als Notbehelf bei ungenügendem Beherrmschein zu vertan. Bei Feuerstätten, die im Dauerbetrieb mit Schmelzkoks arbeiten, sind sie im allgemeinen überflüssig.

- 6 -

9. Stubenreinheit

Schließlich seien noch einige grundsätzliche Bemerkungen zur Frage der "Stubenreinheit" der Feuerstätten verewogenommen. Wenn es sich um gut klassierten, bergfreien Schwelkoks aus Steinkohle handelt, ist die Frage von geringerer Bedeutung. Der Aschegehalt ist bei ihm verhältnismäßig niedrig, zudem ist die Steinkohlensche spezifisch schwer und nimmt daher nur einen geringen Raum ein. Die übliche Größe der Aschenkästen reicht zur Aufnahme der täglich oder auch während eines längeren Zeitraums anfallenden Asche aus. Anders steht es jedoch beim Koks, der bei der Schmelzung der Braunkohle anfällt. Ein dergartiges Zusammenreffen ist es, daß gerade die Braunkohlen, die wegen ihres hohen Feergehaltes allein als schwelwürdig anzusprechen sind, auch den höchsten Aschegehalt aufweisen. Infolge der Gewichtsverringerung der brennbaren Substanz beim Schmelzen steigt der Aschegehalt durchschnittlich auf 20 und mehr Gewichtsteile an. Hinzu kommt, daß die Braunkohlensche spezifisch leicht und daher sehr voluminös ist. Die Aschenräume und bei Linselfeuerstätten die Aschenkästen sind daher entsprechend groß zu bemessen. Ferner ist dafür zu sorgen, daß durch geeignete Leitvorrichtungen die Asche mit Sicherheit in den Aschenkasten fällt. Nichts ist für die Hausfrau lästiger, als wenn bei jedem Öffnen der Feuer- oder Aschentür Asche vor die Feuerstätte fällt und sie diese nachträglich entfernen muß.



## B. Die bauliche Gestaltung der Feuerstätten

Hinsichtlich der Konstruktion der Feuerung sind zwei Typen von Kesselöfen zu unterscheiden:

Ölöfen, von denen kurzzeitig eine hohe Wärmeleistung verlangt wird und bei deren Betrieb längere Betriebszeiten eintreten. Wichtig ist hier Feuerfähigkeit des Brennstoffes, die ein Durchhalten des Feuers ermöglicht und somit das lästige Neuaufladen erspart.

Wasseröfen, von denen eine dauernde, möglichst gleichbleibende Wärmeleistung verlangt wird. Am idealsten wird diese Forderung durch einen Brennstoff erfüllt, dessen Brennpunkt auch im Verlaufe der Verbrennung stetig der Umgebung bleibt.

Von der ersten Gruppe müssen für die Verwendung von Scheiteln vor allem in Betracht die Kochherde, Kesselöfen und Heizwasseröfen für kleine Anlagen.

Die zweite Gruppe umfasst alle Kesselöfen für Raumheizung sowie die Heizkesselanlagen.

### 1. Die Kochherde mit offener Herdplatte oder geschlossenem Lochraum

Für die Speisenbereiung mit festen Brennstoffen haben sich im Laufe der Zeit zwei Typen von Herden herausgebildet. Bei der einen Art wird auf der offenen Herdplatte gekocht. Für bessere Zwecke, nämlich das Braten und Backen, haben diese Herde in der Regel noch zusätzlich einen geschlossenen Kesselraum, der entweder von einer besonderen Feuerung beheizt wird (Abb. 2 a) oder bei dem die Rauchgase des Feuers ausgenutzt werden, das zur Beheizung der Herdplatte dient (Abb. 2 b). Bei einer weiteren Bauart ist der Kesselraum schrankartig geschlossen,

und er wird gleichzeitig für das Kochen, Braten und Backen benutzt. Mitunter wird, wie es z.B. bei den größeren Grubeherden üblich ist, zwei Kochräume übereinander angeordnet. Die Verbrennungsräume werden in Zügen seitlich und oberhalb der Kochräume angeführt (s. Abb. 2 c).

In beiden Herdvarianten zeigt sich der Schmelzkoch gegenüber den anderen bish. gebräuchlichen Brennstoffen, wie Braunkohlenbriketts und Steinkohle, Überlegen. Die ausgezeichnete Handhabbarkeit erleichtert der Hausfrau das Aufheuern außerordentlich; die bequeme Regelbarkeit ermöglicht ihr, zu wissen, wie lange Zeit zum Garen benötigt, ohne ständige Benutzungs- und Bedienung der Feuerung kochen zu lassen; die gute Feuerbrandfähigkeit hält ihr den Herd stets betriebsbereit; Rauch- und Aschfreiheit ersparen ihr viel Arbeit, da sonst für das Reinigen der Herdfläche und auch der Küche aufgewendet werden muß.

Es erhebt sich nun die Frage, ob, von der Verwendungsmöglichkeit des Schmelzkochs her gesehen, beide vorerwähnten Herdvarianten gleichwertig sind, oder ob der einen vor der anderen der Vorzug zu geben ist. Von wirtschaftlichen Standpunkten aus ist das Kochen in geschlossenen Raum der auf der offenen Platte entschieden überlegen. Bei der geschlossenen Bauart wird die Wärme von allen Seiten an das Kochgut übertragen, so daß Mantel und Backteil der Kochtopfe, die sonst kochen auf der offenen Herdplatte unvermeidlich stehbleibenden darobliegen, hier mitbeheizt werden. Dies zeigen auch eingehende Versuche, die der Verfasser auf dem Prüfstand des Ostalbischen Braunkohlenprüfstandes durchführte. Die Versuchsprotokolle und Auswertungen sind leider bei den Bränden des Synthesgebäudes in Berlin zerstört vernichtet worden. Während bei Prüfversuchen nach den Vorschriften der D.M.V. (Vita- und Prüfbestimmungen für die Herde) [1] 1)

1) Die Zahlen in [ ] und in Klammern verweisen auf das Schrifttum der Herdearbeit, S. 37.

- im folgenden kurz zur Hand, kommt - bei den beschränkten Herden Kochherd in der Regel zwischen 15 und 20 % ermittelt wurden, bezogen also bei einem Schrankherd unter den gleichen Bedingungen 16 bis 42 %. Diese Wirkungsgrade gelten für Teillast, d.h. wenn die der Normalleistung der betreffende Herdgrößen entsprechende Wärmeenergie ständig durch Verbrennung freigesetzt wird. Bei Teillast fällt bei den offenen Herden die Wirkungsgradkurve steil ab, weil die Wärmeabgabe des Kochgutes an den Raum bald höher als seine Wärmeaufnahme ist. Es ist daher, wenn man diese Herde dauernd in Betrieb hält, mit einem beachtlichen Heizstoffverbrauch allein zur Deckung der Heizverluste zu rechnen. Gegenüber verläuft die Wirkungsgradkurve bei Herden mit geschlossenem Kochraum (Schrankherden) wesentlich flacher. Auch hier treten selbstverständlich Heizlaufverluste auf, weil sich die Wärmeabgabe der Herde durch die Außenwände nicht ganz vermeiden läßt. Es können aber durch Wahl geeigneter Baustoffe, wie weiter noch angegeben wird, erheblich eingeschränkt werden.

In der Abb. 5 ist der ungefähre Verlauf der Wirkungsgrade  $\eta$  für beide Herdentypen und für verschiedene Brennstoffe in Abhängigkeit von der Heizleistung  $Q$  der Herde angegeben. Da die betreffenden Unterlagen nicht mehr zur Verfügung stehen, sind die Kurven nach dem Gedächtnis wiedergegeben und können daher nur die Tendenz angeben, lassen aber keine Zahlenwerte ausweisen. Das Diagramm gibt aber einen interessanten Einblick in die Zweckmäßigkeit der beiden Herdentypen und in ihre Eignung für die verschiedenen Brennstoffe. Zunächst fällt auf, daß der Kochwistung geschlossener Schrankherd für alle Brennstoffe höher liegt als beim offenen Herd. Die Begründung hierfür wurde schon in der Vergangenheit gegeben. Man ist aber auch festzustellen, daß bei Schrankherden in beiden Feuerstellen der anderen Brennstoffe an und für sich überlegen ist.

- 10 -

Hierfür sind mehrere Gründe maßgebend. Kinnal fallen alle Verluste, die durch unvollkommene Verbrennung der Schmelzprodukte bei Steinkohle und Braunkohlenbriketts in mehr oder minder hohem Maße entstehen, weg. Die Neigung des Schmelzkokes zur CO-Bildung ist bei der niedrigen Brennstoffschicht gering, so daß auch kein nennenswerter Verlust infolge unvollkommener Verbrennung eintritt. Ferner verläuft die Verbrennung durchschnittlich mit geringeren Luftüberschuß, weil der Schmelzkoks, gleichgültig ob aus Steinkohle oder Briketts erschmolzt, eine kleinere Korngröße hat als z. B. Braunkohlenbriketts und daher auch bei flachem Feuer in mehreren Lagen übereinander liegt. Dadurch bleibt der Koks, auch wenn das Feuer schon weit heruntergebrannt ist, besser noch gut bedeckt, so die durch Ausbrand eines Teiles der Koksstücke entstehenden Lücken sich von selbst durch Nachrutschen des Brennstoffes wieder ausfüllen. Dies macht ein Eingreifen der Hausfrau in den Verbrennungsablauf, wie es beispielsweise bei den großstückigen Braunkohlebriketts oder bei backender Steinkohle ständig erforderlich ist, überflüssig und wirkt sich besonders im Winter, während dessen das Feuer sich selbst überlassen bleibt, vorteilhaft aus. Die gleichbleibende Bedeckung des Kokes ist auch ein Hauptgrund, daß der Feuerungswirkungsgrad im Teil- und Schmelzestbetrieb bei Schmelzkoks höher liegt. Auch auf eine andere Tatsache, die zugunsten des Schmelzkokes spricht, sei noch hingewiesen. Ist den anderen Brennstoffen reißt die Wirkungsgradkurve teilweise schon dann ab, bevor sie die Nulllinie erreicht, d. h. es ist bei ihnen nicht möglich, die Leistung so weit zu treiben, daß der Brennstoff nur noch weiter glüht, und also die freigesetzte Wärme gerade nur Deckung des Abfuhrungsverlustes des Brennstoffbettes ausreicht. Bei ihnen muß man daher, wenn man Betriebspensen überbrücken will, einen wesentlich höheren Brennstoffverbrauch in Kauf nehmen. Bei der geschlossenen



• 11 •

Nachdem die Kurve des Schmelzkases im unteren Belastungsgebiet noch ziemlich flach liegt, und die Kurven der anderen Brennstoffe weiter als beim offenen Herd laufen, ist in der geringen Wärmeabstrahlung des Feuerbettes an die wärmeren Umfassungen auch des Feuerzuges zu suchen.

Nachdem bisher die allgemeinen und grundsätzlichen Gesichtspunkte, die bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen, besprochen sind, sollen jetzt konstruktive Einzelheiten der Herde, soweit sie auf die Verwendung des Schmelzkases Bezug haben, behandelt werden. In dem Bestreben, die Qualität der fabrikmäßig hergestellten Feuerstätten allgemein zu heben und minderwertige Konstruktionen auszumerken, wurden von der Brennstoffsyndikaten in den letzten Vertriebsjahren Richtlinien aufgestellt, die dann nach eingehenden Beratungen mit der einschlägigen Industrie von der Reichsarbeitsgemeinschaft für Hauswirtschaft als "Min.-Ekte- und Prüfbestimmungen" herausgegeben wurden. In ihnen die letzten Erfahrungen und Ergebnisse der Untersuchungen berücksichtigt sind, ist es gerechtfertigt, die folgenden Betrachtungen an diese Bestimmungen anzuknüpfen.

## 2. Der Herd gilt offener Kochplatte

### Rezeptgröße und Ausführung

Bei der Bemessung des Raumes und der Feuerzugsstärke ist von der Normleistung der Herde auszugehen. Diese ist nach den langjährigen Erfahrungen der Herdfabriken, die durch eingehende Luftmessungen, vornehmlich auf den Prüfständen der Brennstoffsyndikate ergänzt waren, festgelegt. Einen Schalt über die Leistung der einzelnen Größen der eisernen Herde gibt Zählentafel 7.

- 12 -

**Tafel 1**  
**Leistungsdaten, Heizrostflächen und Heizflächenbe-**  
**lastungen für verschiedene Herdgrößen**

Herd- grö- ße	Abmessungen der gesamten Herdplatte	Heizrost- flächen- leistung <sup>2)</sup>	Frühere Heiz- fläche	Heiz- wärme- be- lastung	jetzige Heizflä- che bei 250 000 Kcal/m <sup>2</sup> h Heizwär- mebe- lastung
	cm x cm = cm <sup>2</sup>	Kcal/h	cm x cm = cm <sup>2</sup>	Kcal/m <sup>2</sup> h	cm <sup>2</sup>
I	70 x 51 = 3570	4600	20 x 15 = 300	220 000	365
II	80 x 51 = 4080	5400	22 x 16 = 352	220 000	370
III	85 x 53 = 4505	5800	22 x 16 = 352	235 000	330
IV	92 x 53 = 5700	6200	22 x 16 = 352	250 000	354
V	100 x 65 = 6500	6800	22 x 20 = 440	220 000	388

Für die Bemessung der Herdgröße wurde bei den Kesselherden seinerzeit eine durchschnittliche Heizwärmebelastung von 220 000 Kcal/m<sup>2</sup> h angenommen. Ursprünglich waren die Roste allgemein größer, als ihre Wärmebelastung noch niedriger. Den Wünschen der Braunkohlenindustrie, die Heizflächen noch kleiner auszuführen, glaubte man damals nicht folgen zu können. Es stellte sich jedoch heraus, daß sie für den üblichen Gebrauch doch noch zu groß sind, da der Teillastbetrieb - die Heizfläche ist nur selten und dann kurzzeitig besetzt - überwiegt. Ohne Berücksichtigung der Leistung - angegeben ist hierbei, daß die für das Backen und Braten verfügbare Wärme noch ausreicht - konnte der Brennstoffverbrauch ganz beträchtlich gesenkt werden, wenn die Heizwärmebelastung für die angegebene Normleistung auf über 250 000 Kcal/m<sup>2</sup> h erhöht wurde. Die geänderten

2) Unter Gesamtleistung wird die Wärmemenge verstanden, die für Kochen und Raumwärme verbleibt, d.h. die Differenz zwischen der im Brennstoff chemisch gebundenen Wärmemenge (Heizwert) und den Verlusten durch freie und gebundene Wärme der Rauchgase und unverbranntes in den Herdrückständen.

Rostflächen sind in der letzten Spalte der Zahlentafel 1 angegeben. In einer für den Praktiker geläufigeren Faustformel beträgt dann die Rostfläche etwa  $\frac{1}{10}$  der "wirksamen Kochfläche"<sup>3)</sup>. Diese Rostgrößen haben sich bei den Versuchen mit Schmelzkoks als die günstigsten erwiesen.

Hinsichtlich der Ausführung der Roste besteht keine Veranlassung, von den in DIN-Blatt 1293 festgelegten Abmessungen - Spaltweite  $7,5 \pm 0,3$  mm und Gesamtbreite Stab + Spalt = 18 mm - abzugehen. Bei einigermaßen stückfestem Koks und nicht zu hohem Anteil an Unterkorn und Grus ist dabei der Rostdurchfall unbedeutend.

Der Rost kann entweder als festliegender Planrost oder auch als beweglicher Schüttel- oder Schieberrost, der eine bequeme Entaschung ermöglicht, ausgebildet werden. Näheres darüber wird an späterer Stelle noch gesagt.

Die weiteren Einzelheiten seien anhand der Schnittzeichnung eines "Umbrandherdes", der den am weitesten verbreiteten Typ darstellt, erläutert, Abb. 2 b.

### Feuerraumhöhe

Die Feuerraumhöhe, die in den BGP mit Rücksicht auf die Verfeuerung gasreicher Steinkohlen einheitlich für alle Herde auf  $18,5 \pm 0,5$  cm festgelegt ist, erscheint für Schmelzkoks zu hoch. Einmal ist ein derartiger Abstand von der Rostfläche zur Herdplatte nicht erforderlich, da der Schmelzkoks fast ohne Flamme verbrennt. Ruß wird nicht ausgeschieden, da unvollständige Verbrennung infolge von Unterkühlung der bei der Entgasung des Brennstoffs entwei-

3) Unter "wirksamer Kochfläche" wird hier die Herdplatte ohne Rahmen und abzüglich der hinteren Flächen, sofern dort ein Wasserkessel eingehängt ist, verstanden.

ehenden Gase nicht auftritt. Zum anderen ist es sogar erwünscht, den Brennstoff möglichst nahe an die Platte heranzubringen, damit bei schwacher Belastung und niedriger Schütthöhe die frei gemachte Wärme in möglichst hohem Maße dem Kochgut zugeführt wird. Grenzen für den Rostabstand sind dadurch gezogen, daß zwischen Rost und Plattenrahmen noch genügend Platz für den Einbau einer Feuertür verbleiben muß, auf die zwecks bequemer Beschickung der Feuerung nicht verzichtet werden sollte.

### Zugquerschnitte bei Unbrand- und Rundzugherden

Die Rauchzüge oberhalb, seitlich und unterhalb des Bratofens können enger als bei Kohlefeuerung gehalten werden. Die Verbrennung verläuft beim Schmelkoks zeitlich gleichmäßig, weil seine brennbare Substanz auch während des Verbrennungsablaufs homogen bleibt. Deshalb weist auch die entstehende Rauchgasmenge keine großen Schwankungen auf. Im Gegensatz dazu treten bei Verfeuerung von Stein- und Braunkohlen während der Entgasungsperiode steile Spitzen in der Rauchgasentwicklung auf. Um sie ordnungsgemäß abzuführen und einen Rückstau zu vermeiden, ist es erforderlich, bei diesen Brennstoffen die Zugquerschnitte von vornherein weiter zu bemessen. Einen Anhalt für die zweckmäßige Bemessung der Zugquerschnitte bei Schmelkoks gibt Zahlentafel 2.

### Zahlentafel 2

Feuerraumhöhe, Höhe der Züge am Bratofen und Rauchrohrdurchmesser für verschiedene Herdgrößen

Herdgröße	Feuerraumhöhe cm	Höhe der Züge am Bratofen			Rauchrohrdurchmesser w mm
		oberhalb cm	seitl. cm	unterhalb cm	
I	14	5	6	6	120
II	15 - 16	6	7	7	130
III	15 - 16	6	7	7	130
IV	15 - 16	6	7	7	130
V	17	7	8	8	145



- 15 -

Das Volumen der Rauchgase nimmt entsprechend ihrer Temperatur vom Feuerraum zum Rauchabzug hin ab. Man strebt, um den Zugbedarf des Herdes niedrig zu halten, eine einigermaßen gleichbleibende Geschwindigkeit an. Bei der konstruktiven Festlegung der Zugquerschnitte ist deshalb darauf zu achten, daß sie bis zum Rauchabzug entsprechend der Volumenverringering der Rauchgase abnehmen. Auf jeden Fall sind plötzliche Querschnittsänderungen, vor allem Zugerweiterungen zu vermeiden, weil sie tote Räume schaffen und zu schädlichen Schmelzungen Anlaß geben. Damit man sich beim Konstruieren Klarheit über die Verhältnisse verschafft empfiehlt es sich, die aufeinander folgenden Zugquerschnitte in ein Stufen diagramm einzutragen (Abb. 5), anhand dessen etwa erforderliche Änderungen durchzuführen sind. Die Verbindungslinie der einzelnen Querschnittsstufen soll möglichst auf einer Linie liegen.

Ebenso wie bei den Zugquerschnitten wären auch bei den Rauchrohrstutzen geringere Durchmesser als bei den Kohleherden zulässig. In Rücksicht auf eine einheitliche Ausführung werde an den in den BGP festgelegten Rauchrohrdurchmessern festgehalten.

#### Genügende und gleichmäßige Erwärmung des Bratofens

Die Herdbauart, wie sie in Abb. 2 b dargestellt ist und wie sie ausnahmslos bei fabrikmäßig hergestellten Herden aus Stahlblech angewendet wird, hat einen Mangel, der darin besteht, daß der Wasserkessel unmittelbar neben dem Bratofen liegt, der ihn in seiner Beheizung beeinflußt. Dadurch, daß der Wasserinhalt einen erheblichen Teil der Rauchgaswärme aufnimmt, wird die ausreichende Erwärmung des Bratofens in Frage gestellt. Ein Mittel, diesen Mangel zu beheben, besteht darin, daß der Bratofen gegen den Wasserkessel durch eine Wand, die entweder aus Stahlblech oder einer Schamotteplatte besteht,

abgeschirmt wird (s. Abb. 6). Wenn trotzdem diese Herdbauart allgemein Eingang gefunden hat, so ist das darauf zurückzuführen, daß sie eine einfache, raumsparende und in der Fabrikation billige Bauweise ermöglicht.

Vom heiztechnischen Standpunkt aus ist jedoch eine andere Bauweise, bei der die Feuerung in der Mitte des Herdes liegt, entschieden vorzuziehen (Abb. 4). Sie wird vielfach bei ortsfesten Kachelherden angewendet. Die Verbrennungsgase ziehen zuerst unter der Herdplatte entlang, umspülen dann den Bratofen und werden erst zum Schluß um den Wasserkessel herumgeführt. Die Hauptfunktionen des Herdes - das Kochen und Braten - werden hier also nicht beeinträchtigt. Dadurch, daß die ganze Bodenfläche des Herdes von den Rauchgasen berührt wird, ist auch ihr Anteil an der Raumwärmerhöhung höher. Im Wasserkessel wird ein Teil der restlichen Rauchgaswärme ausgenutzt.

Die gleichmäßige und ausreichende Erwärmung des Bratofens läßt bei Herden mit offener Kochplatte häufig zu wünschen übrig. Begreiflicherweise ist die Erwärmung auf der Seite der Feuerung und im hinteren Teil des Bratofens größer, weil dort die Abstrahlung der Wärme nach außen nicht so stark ist; eingeschobene Kuchen werden daher an diesen Stellen stärker bräunen und oft gar verbrennen. Ebenso ist häufig die Unterhitze ungenügend. Aus diesem Grunde wurden früher die Herde mit einer Sonderfeuerung unter dem Bratofen versehen. Diese Ausführung ist aber nicht gutzuheißen, weil sie für die Hausfrau eine Verdoppelung der Arbeitsleistung ergibt. Wenn die Ursachen für die ungleichmäßige Erwärmung des Bratofens bei der Umbrandfeuerung erkannt sind, ist es jedoch leicht, sie zu vermeiden.

Einmal muß der Bratofen gegen die Rauchzüge dicht sein. Den Bratkasten hinter und an den Seiten durch Nieten oder Verschweißen der Blechwände dicht auszuführen, bietet

keine Schwierigkeit. Eine gefährliche Falschlufthquelle befindet sich jedoch bei der üblichen Ausführung am Boden des Bratofens, Abb. 7 a. Dieser wird zum Herausziehen eingerichtet, damit man die Flugasche aus dem Bodenzug gelegentlich entfernen kann. Damit wird eine gesonderte, die Herstellung verteuernnde Reinigungstür erspart. Das Bodenblech ruht an den Seiten in Blechfalzen, vorn liegt es jedoch meist ohne besondere Dichtung auf dem Türrahmen auf, so daß hier leicht Falschlufth in den Bodenzug eintritt. Infolge der Mischung und Verdünnung der Rauchgase wird nicht nur die Temperatur erniedrigt und dadurch der Wirkungsgrad verschlechtert, sondern viel schlimmer äußert sich die Wirkung darin, daß die heißen Gase durch die Kaltluft nach hinten abgedrängt werden und der Bratofen vorn kalt bleibt. Er ist dann für manche Zwecke, vor allem das Backen, gänzlich unbrauchbar. Abhilfe ist hier auf verschiedene Weise möglich. Das Einlegen eines Asbeststrickes in die Riefe des Bodenbleches (Abb. 7 b) ist zwar recht wirksam, stellt jedoch keine ideale Lösung dar, da der Strick sich allmählich abnutzt und spröde wird und überdies aus Unkenntnis mitunter weggelassen wird. Konstruktiv nicht zu beanstanden ist die in Abb. 7 c dargestellte Ausführung, bei der der Bratofenboden aus einem gußeisernen Rahmen mit eingelegtem Reinigungsdeckel hergestellt ist. Der Deckel, der zwecks Vergrößerung der wärmeaufnehmenden Fläche noch mit Rippen versehen werden kann, ruht in einem Falz, der mit feinem Sand oder Flugasche zur besserer Abdichtung ausgefüllt wird. Ebenso ist selbstverständlich die vollkommen dichte Ausführung des Bratofens und das Anbringen einer gesonderten Reinigungstür, die allerdings auch dicht schließen muß, einwandfrei (Abb. 7 d). Für die gleichmäßige Temperaturverteilung im Bratofen wirkt sich auch vorteilhaft aus, wenn seine Decke durch Luftströmen oder elektrisches Anpunkten eines zweiten Bleches gegen zu starke Wärmeaufnahme abgeschirmt wird, Abb. 7 e. Ferner ist es empfehlenswert,

- 18 -

die Kanten des Bratofenraumes stark abzurunden, damit eine glatte, ebenfalls zur gleichmäßigen Erwärmung des Bratofenraumes beitragende Strömung der Rauchgase erreicht wird. Sie wird zweckmäßigerweise verstellbar eingerichtet, um den Querschnitt an der Umkehrstelle den vorhandenen Zugverhältnissen anzupassen.

Schließlich ist der Rauminhalt des Bratofens nicht größer zu bemessen, als es für die darin zu bereittenden Speisen erforderlich ist und der Leistungsfähigkeit der Feuerung entspricht. Vor allem ist es wichtig, den Bratofen nicht zu hoch zu bauen. Je mehr sich der Querschnitt des Bratofens der quadratischen Form nähert, um so geringer wird das Verhältnis seiner Heizfläche zum Rauminhalt. Hingegen wird die Wirkung nicht beeinträchtigt, wenn der Bratofen breiter als bisher üblich ausgeführt ist (vgl. Abb. 7 f). Der Zugbedarf erhöht sich dadurch praktisch nicht. Er steigt jedoch erheblich an mit zunehmender Länge des Hürsauges, weil die Rauchgase gezwungen werden, entgegen dem natürlichen Antriebe abwärts zu strömen. Dadurch wird oft, besonders bei ungünstigen Zugverhältnissen, das einwandfreie Arbeiten des Herdes gestört. Hinzukommt wird der Hinweis erhoben, daß eine gewisse Bratofenhöhe nicht unterschritten werden darf, weil sie sonst, z.B. für Topfkochen und dgl., nicht ausreicht. Dies trifft jedoch nicht zu. Bei höheren Bratöfen helfen sich die Hausfrauen in der Regel dadurch, daß sie Steine unterlegen, um die Kochenformen näher an die Bratofendecke zu bringen. Der nutzbare Inhalt des Bratofens wird erheblich vergrößert, wenn er breit ausgeführt wird, da man dann entsprechend große Backbleche oder mehrere Töpfe einsetzen kann.



Wenn diese Erörterungen auch für Herde für alle anderen Brennstoffe gelten, so wird sie an dieser Stelle um so mehr berechtigt, als gerade der Schmelkokk eine vielseitige Benutzung des Bratofens zulässt. Da bei ihm die Leistung bis auf ganz schwache, vor allem auch auf die Dauer konstant einzuhaltende Wärmeabgabe herabgesetzt werden kann, ist es möglich, den Bratofen in idealer Weise für das immer mehr an Bedeutung gewinnende Dörren von Obst und Gemüse zu gebrauchen. Ebenso kann er zum Einkochen von Konserven benutzt werden, ohne daß die Gläser oder Büchsen in ein Wasserbad gestellt zu werden brauchen. Bei anderen Brennstoffen ist dies nicht so gut möglich, weil ihre Regelfähigkeit bei weitem nicht an die des Schmelkokkes heranreicht. -

#### Dichte Ausführung des Herdes unterhalb der Feuerung

Eingangs wurde schon auf die Notwendigkeit hingewiesen, die Feuerstätten für Schmelkokk so dicht wie nur möglich auszuführen. Hierzu seien auch noch einige konstruktive Anregungen gegeben. An der Spitze steht die dichte Ausführung des Aschenraumes. Sofern die Herde aus Stahlblech hergestellt werden, sind die Wände des Aschenraumes an allen Stoßstellen zu verschweißen oder auf andere Weise gasdicht zu verbinden. Der Rahmen der Aschentür ist unter Einlage eines geeigneten Dichtungsmittels (Asbeststreifen oder Kesselkitt) dicht auf der Vorderwand aufzuschrauben. Bei Verwendung von Kitt ist an der Anlegefläche eine Nute vorzusehen, die ein sicheres Haften des Kittes verbürgt, s. in Abb. 8. Von gleicher Wichtigkeit ist ferner das dichte Schließen der Aschentür. Einschließbare Aschenkästen mit Vorderwand, die die Tür ersetzen soll, sind abzulehnen, weil sie keinen dichten Verschluss ermöglichen. Die Dichtflächen zwischen Tür und Rahmen können, wenn sie aus Bleisen bestehen, geschliffen sein

- 20 -

oder als Falzdichtung hergestellt werden, vgl. b, c, e in Abb. 8. Im ersten Falle ist darauf zu achten, daß die Tür satt aufliegt und auch bei kräftigem Anspannen des Verschlusses kein Abheben der Tür auf der Scherenseite eintritt. Zweckmäßigerweise beugt man demselben bei der Fertigung vor, indem man dem Verschuß eine Verspannung gibt. Wenn die fertig geschliffenen Teile (Tür und Rahmen) auf die Vorrichtung zum Bohren der Knaggen gespannt werden, legt man ein etwa 1 mm starkes Blech auf der Seite des Verschlusses zwischen Tür und Rahmen.

Bei Falzdichtung ist Vorsorge zu treffen, daß das Dichtungsmittel fest im Falz haftet und nicht herausfällt. Zweckmäßig ist es daher, wenn der Falz als Schwalbenschwanz, e in Abb. 8, oder als Kreisabschnitt mit innerhalb des Falzes liegendem Kreismittelpunkt ausgebildet wird, d in Abb. 8. Bei Herstellung in Gußeisen erfordert der zweite Vorschlag, der wegen der allseitig gleichen Dicke des Dichtungsmaterials die beste Gewähr für dauerhafte Dichtung gibt, das Einlegen eines Kernes, während die Form mit Schwalbenschwanz ohne weiteres auf einer Durchzugformmaschine hergestellt werden kann. Hingegen ist eine Mittelart beider Falzarten leicht auszuführen, wenn nach einem Vorschlag des Verfassers die Türen aus Stahlblech gefertigt werden, e in Abb. 8. Welcher Werkstoff künftig für die Herstellung bevorzugt wird, dürfte u.a. von der Rohstofflage und den verfügbaren Fertigungswerkstätten abhängen.

Kesselkitt, der allgemein bei Falztüren von Kachelöfen als Dichtungsmittel verwendet wird, ist wegen seiner Sprödigkeit nach dem Aushärten wenig geeignet. Sehr gut bewährte sich hingegen feine Stahlwolle bei Versuchen des Verfassers, die als Strick zusammengedreht wurde. Erwähnt sei auch, daß einer namhaften Ofenfabrik eine Dichtung geschüttet ist, die aus Aluminiumwolle mit einer

- 21 -

keramischen Füllmaterial besteht.

#### Ausführung und Dimensionierung des Luftregelorgans

-----

Das Regelorgan für die Verbrennungsluft wird neuerdings vielfach in der Aschentür untergebracht. Eine ansprechende Lösung, bei der die Rosette unter einer Blechhaube verdeckt angeordnet ist, wird bei f in Abb. 8 gezeigt. Ebenso ist es aber auch möglich, das Luftregelorgan an anderer Stelle anzubringen, z.B. zwischen Aschen- und Feuertür oder, dem Blickfeld entzogen, an der Seiten- oder Hinterwand des Aschenraumes. Entscheidend ist nur, daß die eingangs aufgestellten Forderungen hinsichtlich seines Regelbereiches und seines dichten Abschlusses gewahrt bleiben.

Bei voller Öffnung soll die freie Öffnung des Regelorgans so groß sein, daß sie auch bei schwächstem Schornsteinzug während des ersten Anheizens ausreicht, die erforderliche Luftmenge ohne nennenswerten Druckverlust einströmen zu lassen. Eingehende Versuche auf den Prüfständen und in der Praxis haben ergeben, daß die größte Öffnung bei Herden mindestens 20 % der freien Rostfläche betragen muß. Gestellt nach den früher angegebenen Herdgrößen müssen die Mindestquerschnitte demnach betragen:

bei Herdgröße I bis IV	mindestens	28 cm <sup>2</sup>
" " V	"	35 cm <sup>2</sup> .

Selbstverständlich ist, daß der freie Durchlaß des Reglers an keiner Stelle vor oder hinter der Regelöffnung eingengt oder die Luftströmung durch scharfe Umlenkungen behindert wird.

#### Dichte Ausführung des Herdes oberhalb der Feuerung

-----

Was über die dichte Ausführung der Aschentür gesagt wur-

- 22 -

Es gilt auch für die Fenartür. Besonders kommt hier hinzu, daß die der Strahlung des Glühbettes ausgesetzt ist und sich daher bei ungünstiger Abschirmung leicht verzieht. Am besten bewährt hat sich hier eine gußeiserne, vor die Innenseite der Tür geschweißte Schutzplatte. Diese muß jedoch die ganze Türöffnung überdecken, damit gerade die Richtflächen zwischen Tür und Rahmen gegen zu hohe Erwärmung geschützt werden, s in Abb. 8.

Die Abdeckplatte des Herdes wird in der Regel aus Guss Eisen hergestellt, wobei meistens die eigentliche Kochfläche, die aus einem oder mehreren "Einlegern" besteht, in einem mit dem Herdkörper fest verbundenen Rahmen eingelassen ist. Möglichkeiten für Undichtheiten bestehen einmal an der Richtfläche zwischen dem Herdblech und dem Rahmen, die noch durch die verschiedenartige Erwärmung beider Teile vergrößert werden. Es ist daher vorteilhaft, wenn die Abdichtung durch Einlegen eines Asbeststreifens, wie bei b in Abb. 9 b skizziert, elastisch gestaltet wird. Ferner befinden sich Falschluffquellen an den Auflageflächen der Einleger. Die einfache Auflage (vgl. a in Abb. 9) genügt nicht, da die un bearbeiteten Gussflächen nur an einigen Stellen aufliegen und Spalten frei bleiben, deren Querschnitt bei der beträchtlichen Länge aller Auflageflächen eine ins Gewicht fallende Falschluffmenge eintreten lassen. Nachteilig wirkt sich die Undichtigkeit an diesen Stellen auf die Übertragung der Wärme von den Kochgasen an die Kochplatte aus, weil die Falschluff sich als Schleier zwischen die Platte und die heißen Gase legt. Ferner wird durch Mischung der Falschluff mit den Kochgasen auch deren Temperatur herabgesetzt, so daß auch die ausreichende Erwärmung des



- 23 -

nachgeschalteten Bratofens in Frage gestellt ist. Es ist darum notwendig, die Einleger am Rande mit Dichtleisten zu versehen, die in einen Falz des Herdrahmens greifen, c in Abb. 9. Ebenso sind die Einleger mit ineinander greifenden Falzen auszuführen, wie es schon beim Bratofenboden vorgeschlagen wurde. Bei d in Abb. 9 ist die bei neueren Qualitätsherden angewandte Ausführung dargestellt. Sie hat sich gut bewährt, weist jedoch einen Mangel auf: Durch die scharf vorspringenden Rippen an der Unterseite der Platte wird der Rauchgasstrom von der Platte abgelöst und es bilden sich tote Wirbelräume aus, die den Wärmeaustausch zwischen Rauchgasen und Platte beeinträchtigen. Günstig ist ein dem Strömungsverlauf angepaßter allmählicher Übergang von den Rippen zur Plattenfläche, e in Abb. 9. Diese vom Verfasser auf Grund seiner Beobachtungen bei der Verfeuerung gasreicher Brennstoffe gegebene Anregung ist auch für den Schmelkokk von Wichtigkeit, weil sich die Verbrennung bei diesen wegen seiner leichten Vergasbarkeit auch noch oberhalb des Brennstoffbettes fortsetzt. Infolgedessen tritt beim Wärmeaustausch die durch Strahlung übertragene Wärmemenge zurück zugunsten der Wärmeleitung von den hochtemperierten Verbrennungsgasen an die Heizflächen übergehenden Menge.

In gleicher Weise ist eine Abdichtung zwischen Kochlochdeckel und Einleger erforderlich, f in Abb. 9. Ringsätze sind, weil sie keine ebene Auflage für die Töpfe ergeben und außerdem sehr undicht sind, zu verwerfen. Zur Verbesserung der Wärmeaufnahme kann der Kochdeckel auf der Unterseite mit angegossenen Zapfen (g in Abb. 9) versehen werden. Lange Rippen, wie vielfach ausgeführt, sind weniger vorteilhaft, weil sie die Rauchgasströmung behindern an unerwünschte tote Räume unter der Kochplatte schaffen...

Für das einwandfreie Arbeiten des Herdes, insbesondere die gute Erwärmung des Bratofens, ist endlich noch das dichte Schließen der Anheizklappe von Wichtigkeit. Sie ist notwendig, um bei schwachem Schornsteinzug überhaupt das Anheizen zu ermöglichen. Die Rauchgase werden bei geöffneter Klappe sofort in den Schornstein geleitet. Ist dann der Auftrieb groß genug, wird die Anheizklappe geschlossen, so daß die Rauchgase den Bratofen umspülen müssen. Es ist nun die Forderung zu stellen, daß einmal die Klappe im geschlossenen Zustande verbleibt und nicht von selbst aufgeht, und ferner, daß sie sich auch bei starker Erwärmung nicht verzieht. Gegen das Selbstöffnen wird zweckmäßigerweise eine Knagge oder ein Arretierstift am Griff vorgesehen, a in Abb. 10, der die Klappe in den beiden Endstellungen festhält. Um ein Verziehen zu verhindern, ist es zweckmäßig, die Klappe mit Rippen zu versehen. Diese können, wie bei b in Abb. 10 gezeigt, gleichzeitig zur Verbesserung der Abdichtung benutzt werden. Eine selbstverständliche Forderung ist, daß das ordnungsgemäße Schließen der Klappe nicht durch abgelagerte Flugasche behindert wird. Die Klappe darf daher nicht auf der Bratofendecke schleifen, sondern muß einige Millimeter Spiel haben.

#### Maßnahmen zur Erzielung der Stubenreinheit.

In einem früheren Abschnitt wurde schon auf die Bedeutung hingewiesen, die die schutzfreie Bedienung des Herdes für die Hausfrau hat. Besonders wichtig ist dies dann, wenn ein aschereicherer Schmelzkoks verwendet wird. Allgemein gilt ja, daß der Schmelzkoks bei vernünftiger Wartung kaum zur Schlackenbildung neigt. Das ist für die Hausfrau zweifellos angenehm und arbeitsparend. Andererseits führt der staubförmige Anfall der Asche leicht dazu, daß beim Öffnen der Türer und dem Entfernen der Asche die Umgebung verschmutzt wird. Diesem ist durch geeignete konstruktive Maßnahmen vorzubeugen.

Beim Öffnen der Feuertür fällt häufig unverbrannter Brennstoff oder Asche heraus. Dieses kann, wenn auch nicht ganz beseitigt, so doch erheblich dadurch eingeschränkt werden, daß der Rost mehr in die Mitte des Herdes gelegt wird, a in Abb. 11, und der davor angebrachte Schamottestein, die "Rostvorlage", zum Rost hin geneigt eingesetzt wird, b in Abb. 11. Durch den bei schnellem Öffnen der Feuertür entstehenden Zug wird ferner Asche und Grus mitgerissen. Wenn die Tür zu schwer aufgeht oder der Griff unbequem zu fassen ist oder zu heiß wird, wird die Hausfrau verleitet, die Tür mit einem Ruck zu öffnen. Es ist daher Vorsorge zu treffen, daß die Tür nicht klemmt und leicht gangbar bleibt. In dieser Hinsicht sind kurze Griffe mit Vorreißer ungeeignet, die unmittelbar auf der Tür angebracht sind; ebenso ungeeignet sind auch einige neuere Versuchskonstruktionen, bei denen ein Selbstschließen der Tür beim bloßen Zuschlagen durch Federstahlstifte oder dgl., die hinter eine an der Tür angebrachte Kragge fassen, herbeigeführt werden soll. Am besten bewährt haben sich bisher Knebelverschlüsse mit langem, bequem anzufassendem Griff. Eine gute Lösung dieser Art zeigt h in Abb. 8.

Die Bedienung wird wesentlich vereinfacht, wenn der Rost als Rüttel- oder Schieberrost ausgebildet wird. Bei bak-kenden oder leicht zur Schlackenbildung neigenden Brennstoffen bleibt der Erfolg des Rüttelns oft zweifelhaft, weil trotz Bewegung des Rostes - sofern er sich überhaupt noch bewegen läßt - das Brennstoffbett in Ruhe bleibt. Bei Verfeuerung von Schmelkokks treten diese Unannehmlichkeiten nicht auf. Es genügen einige Bewegungen, um die Asche vom Rost zu entfernen. Ein besonderer Vorteil des Rüttelrostes besteht bei Verwendung von Schmelkokks auch darin, daß er in geradezu idealer Weise eine schonende Bewegung in das ganze Brennstoffbett bringt. Dadurch wird die Aschenhülle, die sich mit zunehmendem Abbrand um die Koksstückchen bildet, abgestreift, und das Brennstoffbett

- 26 -

eingeebnet. Die Feuerung läßt sich dann schnell wieder auf volle Leistung bringen und die Verbrennung verläuft wegen der gleichmäßigen Restbedeckung mit niedrigem Luftüberschuß. Am einfachsten und für den Schmelkokk am günstigsten ist beim Herd der Schieberrost, Abb. 11, c. Er muß nur gut in einem allseits übergreifenden Rahmen, der das Dazwischenfallen von Kokkstückchen und damit das Klemmen verhindert, geführt sein. Außerdem entsteht bei Durchführung der Zugstange durch die Herdwandung keine schädliche Öffnung, da die Bohrung stets von der Zugstange ausgefüllt ist. Die einzelnen Stäbe des Tafelrostes können entweder glatt oder leicht gewellt sein, wodurch die Bewegung des Glutbettes verstärkt wird, d in Abb. 11, c.

Unter dem Rost sollen Leitbleche angeordnet werden, die alle durchfallende Asche in den Aschenkasten leiten, e in Abb. 11, c. Wenn der Aschenfall nicht zu hoch ist, können sie so lang gemacht werden, daß zwischen ihnen gleichzeitig der Aschenkasten geführt wird. Anderenfalls sind am Boden des Aschenraumes Führungsschienen anzubringen, zwischen denen der Aschenkasten eingeschoben wird.

Der Aschenkasten muß bei Verwendung eines aschereichen Braunkohlenschmelkokkes mindestens die Asche eines Vollbetriebstages fassen können. Entsprechend der Leistung der vorher angeführten Herdgrößen und unter Berücksichtigung der Menge und des spezifischen Gewichtes der Asche muß sein nutzbarer Inhalt daher betragen:

bei Herdgröße	I	3 l
" "	II	4 l
" "	III	4 l
" "	IV	4 l
" "	V	5 l.

Die Vorderwand des Aschenkastens ist abzuschrägen, damit die Asche beim Entleeren ohne Staubeentwicklung herausgleiten kann.

- 27 -

b. Herd mit geschlossenem Kochraum (Schrankschrankherd)

Im Westen Deutschlands gab es schon immer eiserne Öfen mit eingebautem Kochraum, der sog. "Kochkachel", im Osten Deutschlands und der angrenzenden Ländern war es üblich, die ortsfest gemauerten Heizöfen mit großem Kochraum, der vom Flur oder der Küche aus zugänglich war, zu versehen. Diese Konstruktion hat in den letzten Jahrzehnten für Spezialzwecke wieder Bedeutung gewonnen.

Grundsätzliches zum Grudeherd

Um den Grudekoks, der bei der Schwelung von Rohbraunkohle oder wenig standfester Briketts kleinkörnig anfällt, im Hausbrand absetzen zu können, mußte man erst geeignete Feuerstätten entwickeln, in denen er wirtschaftlich verwendet werden konnte. Da der Grudekoks wegen seiner dichten Lagerung in der Feuerung bei dem geringen Zug, den die Haushaltsschornsteine liefern, nicht flott brennt, sondern nur langsam glimmt und daher in der Zeiteinheit nur eine geringe Wärmemenge entwickelt, erschien für ihn ein Herd mit geschlossenem Kochraum geeignet, weil bei diesem die Wärmeabstrahlung nach außen nur gering ist. So entstand der allbekannte "Grudeherd". Auf seine Einrichtung im einzelnen einzugehen, dürfte sich im Rahmen dieser Arbeit erübrigen, weil seine Entwicklung als abgeschlossen gelten kann. Außerdem ist seine Verbreitung auf das Erzeugungsgebiet des Grudekokes im mitteldeutschen Raume beschränkt. Der Grudekoks dürfte in Zukunft noch an Bedeutung verlieren, da man immer mehr dazu übergeht, besonders aufbereitete standfeste Braunkohlenbriketts zu verschwelen, die einen stückfesten Schwelkoks liefern.



### Allgemeine Vorteile des Schrankherdes

An einer Tatsache darf man jedoch nicht achtlos vorbeigehen. Hausfrauen, die sich an das Kochen im Grudeherd einmal gewöhnt haben, mögen ihn nie mehr missen. Die Möglichkeit, Speisen, die eine längere Kochdauer erfordern, ohne Beaufsichtigung kochen zu lassen, ferner ständig Warmwasser zur Verfügung zu haben, bedeutet einen Vorteil, den kein anderer Herd in diesem Maße bietet. Es liegt daher nahe, auch für den stückigen Schmelzkoks aus Stein- oder Braunkohle diese Herdkonstruktion anzuwenden, da er die Annehmlichkeit des langsamen Dauerbrandes in noch höherem Maße besitzt, darüber hinaus aber noch eine beim Grudekoks nicht erreichbare Steigerung der Wärmeleistung ermöglicht.

Auf einen anderen Umstand, der zwar nicht in unmittelbarem Zusammenhange mit dem Thema steht, sei doch kurz hingewiesen. Als man zu der Zeit der schweren Bombenangriffe, durch die viel Wohnraum vernichtet wurde, an den Bau von Behelfsheimen ging, trat auch die Frage ihrer zweckmäßigen Beheizung, die möglichst vom Kochherd aus erfolgen sollte, auf. Der übliche eiserne Herd mit offener Kochplatte befriedigte wenig, weil er kaum Wärme speichert, und daher das Heim während der Betriebspausen des Herdes zu stark auskühlte. Außerdem war das Kochen auf offener Platte auch aus hygienischen Gründen zu beanstanden, da die Kochdünste und der Irsen z.B. beim Wäschekochen in den einzigen auch für den Tagesaufenthalt und das Schlafen verfügbaren Raum traten und ihn unerträglich feucht machten. Dieser Umstand ist auch für die zukünftigen Planungen, bei denen sicher die Wohnküche im Vordergrund stehen wird, wichtig.

### Material und Ausführung des Herdmantels

Der für Grudekoks konstruierte Herd ist einschließlich der Feuerung aus dünnem Stahlblech gebaut. In der Praxis hat sich diese Ausführung auch durchaus bewährt, da die thermische Beanspruchung wegen des nur glimmenden Abbrandes des Grudekoks nur gering ist. Vorsorge mußte andererseits dafür getroffen werden, daß die Blechwände usw. im Bereiche niedrigerer Temperaturen durch den Angriff schwefliger Gase nicht zu rasch zerfressen wurden. Deshalb wurden üblicherweise die Rauchrohre usw. verbleit.

Andere Anforderungen stellt demgegenüber der stückfeste Schmelzkoks, gleichgültig ob er aus Stein- oder Braunkohle erschmolzen ist. Auf seine Neigung zum "Durchgehen", d.h. die sich von selbst steigende Intensität der Verbrennung, die die der Kohlen teilweise übertrifft und die mit fallendem Aschgehalt wächst, wurde früher schon hingewiesen. Dauerhafte Ausmauerung der Feuerung mit Schamotte und bleibende Dichtigkeit (vor allem unterhalb der Feuerung) sind hier in erhöhtem Maße erforderlich.

Eine vielversprechende Konstruktion, die allerdings wegen der damaligen Material- und Herstellungsschwierigkeiten noch nicht bis zur Fertigungsreife gediehen war, wurde im vergangenen Jahr auf unserem Prüfstand untersucht und gemeinsam mit dem Hersteller weiter entwickelt, Abb. 12. Neben Braunkohlenbriketts wurde bei diesen Versuchen auch Braunkohlen-Stückkoks verwendet. In der Materialfrage wurden insbesondere von dem Ofenfabrikanten Briel, Reutlingen, teilweise neue Wege beschritten, auf die hier bei Erörterung der Konstruktionseinzelheiten näher eingegangen werden soll.

Bei dem damaligen Mangel an Feinblech stellte sich Briel die Aufgabe, sowohl für den Mantel des Kochraumes als

auch für die Außenwände keramisches Material in möglichst dünner Wandstärke zu verwenden, um einen guten Wärmedurchgang zu erzielen. Es gelang ihm, Platten von nur 10 mm Stärke, die den thermischen Dauerbeanspruchungen durchaus gewachsen waren, auf kaltem Wege herzustellen. Die Platten bestanden aus zerkleinerter Schamotte mit Zement als Bindemittel und waren mit einem dünnen Drahtgewebe armiert. In 10 mm Stärke wurden die Platten für den Mantel des Kochraumes benutzt, a in Abb. 12, während die Außenwände aus gleichem Material 3 bis 5 mm stark waren, um eine größere Wärmespeicherung zu erhalten, b in Abb. 12. Die Außenflächen der Wände waren mit einer in verschiedenen Farben herzustellenden Kaltglasur versehen, so daß sich jeder Brennprozeß erübrigte.

Trotz der günstigen Versuchsergebnisse wird man in normalen Zeiten die Wände des Kochraumes der billigeren Herstellung wegen aus Stahlblech anfertigen. Allerdings müssen sie aus hygienischen und Haltbarkeitsgründen durch einen Überzug gegen Korrosion geschützt werden. Am besten ist es, die Blechwände auf beiden Seiten mit einem schlag- und feuerfesten Emailleüberzug zu versehen. Für die Außenwände wird sich jedoch das gefälligeren Aussehens und der größeren Wärmespeicherung wegen empfehlen, das keramische Material beizubehalten.

#### Rost und Feuerung

sind der verlangten Gesamtleistung des Herdes anzupassen. Die Rostwärmebelastung ist wie bei den Herden mit offener Kochplatte mit etwa  $250\,000\text{ kcal/m}^2\text{h}$  anzusetzen. Dank des höheren Gesamtwirkungsgrades gegenüber den Herden mit offener Kochplatte - im Durchschnitt wurde er zu über 80 % ermittelt - beträgt die Gesamtleistung bei einer Rostgröße von  $15 \times 20 = 300\text{ cm}^2$  und der angegebenen Rostwärmebelastung mindestens  $6000\text{ kcal/h}$ . Die Feuerraum-



höhe, d.h. der Abstand zwischen Rost und Boden des Kochraumes, ist im vorliegenden Fall auf 14 cm festzulegen. Entsprechend sind bei größeren Herdtypen die vorhin angegebenen Maße unter Berücksichtigung der günstigeren Ausnutzung zu übernehmen. Allerdings ist es kaum erforderlich, den Schrankherd in wesentlich größeren Abmessungen herzustellen, da die Leistung des untersuchten Herdes schon an die der größeren Haushaltsherde heranreicht.

#### Zugführung und Zugquerschnitte

Die Zugführung richtet sich danach, ob sich die Feuerung in der Mitte der Vorderfront des Herdes (s. in Abb. 12) befindet oder ob sie einseitig mit daneben angebrachtem Wasserkessel eingebaut wird, Abb. 13. Die erste Lösung ist vorzuziehen, weil sich der Zug einfacher führen und der Kochraum sich gleichmäßiger erwärmen läßt. Die Zughöhe unterhalb der Bodenplatte soll mindestens 6 cm betragen, damit auch bei Ablagerung von Flugasche ein noch ausreichender Querschnitt verbleibt. Dieser ist auch deshalb notwendig, weil der Ausbrand der Gase sich bis in die waagerechten Züge erstreckt. Hingegen genügt für die beiden aufsteigenden Züge eine Breite von etwa 3 cm, da jeder Zug nur die Hälfte der Rauchgasmenge aufzunehmen hat und außerdem der gesamte Strömungswiderstand des Herdes, da er nur waagerechte und aufsteigende Züge hat, sehr gering ist. Die Peckenzüge sind wieder höher zu wählen. Mit Rücksicht auf die Flugaschenablagerung sollen auch sie mindestens 6 cm hoch sein. Eine zu starke Absenkung der Geschwindigkeit wird dadurch vermieden, daß Leitungen beiderseits des Rauchabzuges eingebaut werden. Dadurch werden einmal die Zugquerschnitte verkleinert, zum anderen werden die Rauchgase, nachdem sie die Breiten des Kochraumes auf der ganzen Fläche umspült haben, an die Vorderseite gedrängt. Dadurch wird hier eine stärkere Beheizung erwirkt, so daß trotz der stärkeren

Abkühlung an der Türseite die Erwärmung des Kochraumes ausgeglichen ist. Wärmetechnisch von Vorteil ist, wenn in die Decke des Schrankherdes ein Wasserkessel eingebaut wird, der eine weitere Ausnutzung der Rauchgaswärme gestattet. Er kann fast die ganze Deckenfläche einnehmen, so daß sein Inhalt bequem den Warmwasserbedarf des Haushaltes decken kann. Um die Entnahme des warmen Wassers für die Hausfrau bequem zu machen, kann ein unten mit Entleerungshahn versehenes Rohr in einem Seitenzug bis in Handhöhe heruntergeführt werden. Während bei dem Schrankherd ohne Wasserkessel der Rauchrohranschluß zweckmäßig in die Decke eingelegt wird, empfiehlt es sich hier, ihn gemäß Abb. 14 an der Rückwand anzuordnen.

#### Ausführung des Kochraumes

Für die Hausfrau ist es angenehm, wenn sie statt zweier Kochräume, wie sie häufig bei größeren Grudeherden anzutreffen sind, nur einen, der dafür entsprechend hoch ist, zu bedienen hat. Sie kann dann die Speisen zubereiten und sie beobachten, ohne die Töpfe aus dem Herd herausnehmen zu brauchen; dann können auch größere Töpfe, die u.a. in Haushalten mit Kleinkindern zum Wäschekochen benötigt werden, eingesetzt werden. Bedenken, daß die Erwärmung bei größerer Höhe nicht ausreichen würde (wie z.B. beim Bratofen des Herdes mit offener Platte), bestehen hier nicht, denn der Boden des Kochraumes wird unmittelbar von der Feuerung beheizt und der Temperaturabfall der Rauchgase ist in den aufsteigenden Zügen nicht so stark wie in den fallenden Zügen bei Herden mit offener Kochplatte. Ferner ist für das gute Gelingen des Koch- und Backgutes entscheidend, daß die Unterhitze intensiver als die Oberhitze ist. Diese kann dadurch geregelt werden, daß die Töpfe bzw. Backformen auf einen Rost gesetzt werden, der auf seitlich an den Wänden des Koch-

Raumes angebrachten Leisten eingeschoben wird. Außerdem ist es hierbei möglich, in mehreren Etagen zu kochen, ähnlich wie beim Turmkochen mit Gas.

Die Tür des Kochraumes kann entweder als Falltür oder auch zweiflügelig nach beiden Seiten aufschlagend ausgebildet werden. Im ersten Fall ist dafür zu sorgen, daß sie in waagerechter Lage gehalten wird, um darauf die Töpfe verschieben zu können. Als zusätzliche Abstellfläche ist sie für die Hausfrau recht erwünscht. Sie behindert allerdings, wenn der Kochraum höher ist, die Bedienung, weil sie dann zu weit ausladet.

Anzustreben ist natürlich, daß die Tür möglichst dicht im Rahmen liegt. Dies ist jedoch, zumal die Türen entweder selbstschließend ausgebildet werden oder nur einen leichten Knebelverschluss haben, wegen des geringen Anpressdruckes kaum zu erreichen. Es ist daher erforderlich, den Kochraum gegen die Heizzüge gut abzudichten. Ein Vorschlag für die Ausführung ist in Abb. 15 skizziert. Der Boden wird wegen der hohen Wärmebeanspruchung aus Gußeisen hergestellt. Er besteht aus einem aus vier Gußeisen zusammengeschraubten Rahmen, in den ein zweiteiliger "Einleger" mit Kochloch eingesetzt wird. Einleger und Kochlochdeckel haben an der Unterseite umlaufende Leisten, die in einen Fals des Rahmens bzw. des Kochloches eingreifen und mit feinem Sand abgedichtet werden. An den Rahmen sind die aus emailliertem Blech bestehenden Seitenwände angeschraubt. Mit Rücksicht auf die Raumausnutzung im Emaillierofen werden Deckel und Seitenwände getrennt hergestellt und dann zusammengeschraubt. Der Kochraumkasten wird dann mit Kesselkitt an den Türrahmen und die Hinterwand des Herdes angeschraubt.

Um den Wrasen aus dem Kochraum abzusaugen, pflegt man in der Ofenecke oft eine Rosette anzubringen. So zweckmäßig

sie an sich ist, um bei starker Dampfbildung das Austreten von Dampf aus der Tür zu vermeiden, so kann sie sich doch, wenn sie aus Unachtsamkeit offen gelassen wird, nachteilig auswirken, weil dauernd kalte Luft durch sie eingesaugt wird. Auf die Verbrennung hat die Falschlufte zwar keinen schädlichen Einfluß, da sie erst in den letzten Heizzug eintritt, sie beeinträchtigt jedoch in erheblichem Maße die Gleichmäßigkeit der Temperatur im Kochraum.

### Weitere Konstruktionsteile

Für die übrigen Konstruktionsteile (dichte Ausführung der Türen, Ausbildung des Rostes als Rüttelrost, Größe des Aschenkastens, Anbringen von Ascheleitblechen unter dem Rost) gilt das Gleiche, was darüber beim Herd mit offener Kochplatte gesagt wurde.

Die Vorteile, die der Schrankherd dem Herd mit offener Platte gegenüber gerade bei Verwendung von Schmelzkoks aufweist, lassen es wert erscheinen, dieser Konstruktion in Zukunft größte Beachtung entgegenzubringen.

## II. Der Badeofen

\*\*\*\*\*

### a. Heizung des mit Schmelzkoks befeuerten Badeofens für die ständige Warmwasserbereitung

Die Badeöfen älterer Bauart, die gewöhnlich aus einem Feuerungsuntersatz und darauf gesetztem doppelwandigen Zylinder mit Wasserfüllung bestehen, sind wegen ihrer großen Undichtheiten nur für kurzzeitigen Vollbetrieb, d.h. für die Bereitung eines oder mehrerer Dicht auf einander folgender Bäder geeignet. Hingegen ist es bei ihnen nur durch unwirtschaftlich hohen Brennstoffverbrauch



und laufenden Bedienungsaufwand möglich, das Wasser über längere Zeit auf einer annehmbaren Temperatur zu halten, die auch für andere Haushaltszwecke, z.B. zum Geschirrspülen usw. ausreicht. Im Hinblick auf ihren ursprünglichen Zweck verzichtete man auf jede Regelmöglichkeit und begnügte sich damit, den Aschenkasten, dessen Vorderwand gleichzeitig als Backel dient, je nach der Zugstärke mehr oder weniger weit herauszuziehen.

Die Möglichkeit, den Badeofen auch als Warmwasserbereiter zu benutzen, d.h. ihn dauernd zu beheizen, wurde erst verhältnismäßig spät erwogen. Anstoß dazu gab einmal die Tatsache, daß die ständige Lieferung von Warmwasser der Hausfrau und auch allen anderen Mitgliedern des Haushaltes mehr Erleichterung in der Arbeit und Annehmlichkeit bietet als etwa die zentrale Beheizung der Wohnung. Das ist auch der Grund, daß die Gas- und Stromgeräte trotz der verhältnismäßig hohen Kosten der Energie auch in den minderbemittelten Volkskreisen so rasch und in so hohem Maße Eingang fanden. Andererseits führte die technische Verbesserung an den anderen Feuerstätten dazu, die dort gewonnenen Erkenntnisse auch auf die Badeöfen zu übertragen. Ausschlaggebend war hierbei, daß die Herstellerfirmen von Öfen und Herden, den Anregungen der Braunkohlenindustrie folgend, die Konstruktion ihrer Geräte vornehmlich den Eigenschaften der Braunkohlenbriketts anpaßten. Diese ermöglichen es erst, dank ihrer guten Dauerbrandfähigkeit, den Badeofen ständig betriebsbereit zu halten; nach Aufheizen des Wassers wird durch den allmählichen Abbrand der Glut gerade so viel Wärme erzeugt, wie das Wasser durch Leitung und Strahlung des Außenmantels an die Umgebung verliert. Gegenüber Braunkohlenbriketts bietet aber die Verwendung von Schmelkoks noch weit günstigere Aussichten. Bei den bitumenhaltigen Brennstoffen ist die Gefahr der Versteuerung und Verkrustung der Heizflächen recht groß, weil die Flammen unmittelbar an die wassergekühlten Flächen

schlagen und dadurch ihr restloser Ausbrand beeinträchtigt wird. Bei der Konstruktion für diese Brennstoffe muß man sich daher, oft unter Verzicht auf die Schaffung günstiger Verhältnisse für die Wärmeübertragung, gewisse Beschränkungen auferlegen, um geringe Ablagerungsflächen für Flugasche und Teer zu erhalten und ihre leichte Reinigung zu ermöglichen. Diese Bedenken fallen beim Schmelzkoks fort, so daß die wärmetechnischen Maßnahmen mehr in den Vordergrund treten können. Andererseits ist beim Schmelzkoks, der je nach seiner Herkunft einen mehr oder minder hohen Schwefelgehalt hat, der Materialfrage erhöhte Bedeutung zu schenken. Korrosionsempfindliche Metalle dürfen, weil der Taupunkt der Rauchgase, besonders im Schwachlastbetrieb, häufig unterschritten wird, nicht verwendet werden oder müssen mit einem geeigneten Überzug versehen werden. Gut bewährt hat sich eine säurefeste Emaillierung.

#### b. Bauarten der Badeöfen und Kleinwarmwasserbereiter.

Bei den Badeöfen und Kleinwarmwasserbereitern sind zwei Typen zu unterscheiden: Zunächst die bereits erwähnte mit Feuerungsuntersatz und darauf gesetztem doppelwandigen Wasserzylinder, Abb. 16 a, dann eine andere, bei der die Feuerung in dem Wasserbehälter eingebaut ist, so daß er allseitig von Wasser umspült wird, Abb. 16 b. Wenn man den Gesamtwirkungsgrad, d.h. die zur Wassererwärmung und Raumheizung gesamt nutzbar gemachte Wärme betrachtet, sind beide Typen durchaus gleichwertig. Der Anteil der Wassererwärmung ist jedoch bei dem Warmwasserbereiter mit eingebauter Feuerung größer, und er kann noch gesteigert werden, wenn der Mantel isoliert wird. Die Wahl des Typs hängt von den im Einzelfall vorliegenden Ansprüchen ab, z.B. ob ein Badezimmer, das hohe Wärmeverluste hat, mitbeheizt werden soll, oder ob der Warmwas-

- 37 -

herbereiter in einem Nebenraum, auf dessen Beheizung kein Wert gelegt wird, aufgestellt werden soll.

Zu der Konstruktion beider Typen, soweit sie für die Verwendung von Schmelzkoks Interesse haben, seien im folgenden einige Anregungen gegeben.

### c. Bauliche Einzelheiten

#### Rostgröße und Rostausführung

Da der Strömungswiderstand des ganzen Badeofens außerordentlich niedrig ist, kann unter normalen Zugverhältnissen die Rostwärmebelastung wesentlich höher als bei den Herden mit etwa 350 000 bis 400 000 kcal/m<sup>2</sup>h angesetzt werden. Die totale Rostgröße R ist dann aus der Forderung, daß bei einem Wirkungsgrad von etwa 50 % ein Vollbad von 120 l mit einer Auslauftemperatur von 40° in 40 min hergestellt werden soll, zu ermitteln:

$$R = \frac{120 (40 - 10) \cdot 60}{400\,000 \cdot 0,5 \cdot 40} = 0,027 \text{ m}^2.$$

Dies entspricht einer Rostfläche von etwa 14 x 20 cm<sup>2</sup>.

Die der Berechnung zugrunde gelegte Rostwärmebelastung wird im praktischen Betrieb nur beim ersten Hochheizen und bei der Badbereitung verlangt. Die Wassorentnahme für andere Zwecke macht stets nur einen Bruchteil der für ein Bad benötigten Wassermenge aus, so daß auch die Rostbelastung dann entsprechend geringer ist.

Wenn der Badeofen ständig in Betrieb gehalten wird, empfiehlt es sich sehr, einen Mittelrost vorzusehen. Bei Öfen mit getrenntem Feuerungsuntersatz wird dieser zweckmäßig als Ziehrost ausgebildet, da unterhalb der Ausmauerung genügend Raum dafür vorhanden ist. Bei eingebautem Feuerraum ist wegen der beschränkten Platzverhältnisse jedoch ein Mittelrost angebracht.

### Dichtheit der Ausführung

Besonderes Augenmerk ist wieder mit Rücksicht auf den Dauerbrand der Dichtheit der Feuerung zu schenken. Die Feuer- und Fülltür wird gern als Falltür ausgebildet, weil sie für die Bedienung angenehm ist. Besonders gilt das für den Fall, wenn der Ofen auf dem Fußboden steht. In letzter Zeit ist man aus Gründen der Raumeinsparung mehr und mehr dazu übergegangen, den Ofen auf Konsolen an der Wand zu befestigen. Auch hierbei hat man die Falltür der angenehmeren Bedienung wegen beibehalten. Es muß aber unbedingt verlangt werden, daß ihre Ausführung für die Dauer einen dichten Verschluss verbürgt.

Zunächst ist erforderlich, daß die Dichtflächen aufgeschliffen werden. Es ist dringend zu empfehlen, sich nicht mit einem losen Wippen der Tür vermöge ihrer Schwerkraft zu begnügen, sondern den Bedienungsgriff als Knebelverschluss auszubilden, a in Abb. 17. Ferner ist zu berücksichtigen, daß die Tür der Strahlung der Glut stark ausgesetzt ist. Deshalb muß sie unbedingt durch eine gußeiserne Hantel, wie bei b in Abb. 17 gezeigt ist, geschützt werden. Bei der Bedienung macht sich immer sogleich bemerkbar, wenn beim Einfüllen von Brennstoff kleine Koksstückchen oder Gras zwischen die Dichtflächen und auf die Innenseite der Klapptür fallen. Dadurch wird das einwandfreie Schließen der Tür verhindert; außerdem wird dadurch die angestrebte Stubenreinheit beeinträchtigt. Diesem Mangel kann man dadurch abhelfen, daß nach Art der Abb. 17 bei c eine Klappe drehbar an der Schutzplatte b befestigt wird, die beim Schließen auf der Türzarge entlang gleitet und den darauf liegenden Gras in die Feuerung befördert.

Die Dichtflächen der Aschentür müssen ebenfalls aufgeschliffen sein oder können auch mit Falzen, wie beim



Küchenherd beschrieben, versehen sein.

Bei den Badeöfen mit besonderem Feuerungsuntersatz ist die Dichtung des ringförmigen Sitzes zwischen diesem und dem Wasserzylinder besonders wichtig. In dieser Hinsicht lassen die meisten Konstruktionen noch zu wünschen übrig. Wegen der verschiedenartigen Ausdehnung des Untersatzes und des Zylinders ist auf elastische Dichtung Wert zu legen. Am besten eignet sich hierfür ein nicht zu dünner Asbestring oder auch ein Strick aus Stahlwolle, der in einen Falz des Untersatzes eingelegt wird, d in Abb. 17. Der Außenrand des Falzes soll genügend über den Zylinder übergreifen, um die Dichtung zu schützen. Wenn der Mantel des Untersatzes aus Stahlblech besteht und der Türrahmen aufgeschraubt wird, sind die Auflageflächen ebenfalls durch Einformen eines Nutes, der mit Kesselkitt ausgestrichen wird, zu dichten, e in Abb. 17.

#### Vergrößerung der Heizflächen

Hinsichtlich der Gestaltung der Heizfläche hat man bei Schmelkoks, worauf bereits früher hingewiesen wurde, wegen der geringen Verschmutzungsgefahr größere Freiheiten und kann die wärmeaufnehmenden Flächen z.B. durch Rippen oder Verlängerung des Rauchgasweges vergrößern. Selbstverständlich müssen sie für eine in größeren Zeitabständen vorzunehmende Säuberung leicht zugänglich sein. Im Flammrohr des Wasserzylinders können Rippen oder Prellbleche eingebaut werden. Bei Öfen mit eingebauter Feuerung kann man einen Sturzgang oder eine Unterteilung der Rauchgaskanäle versehen, Abb. 18 a bis d.

#### d. Kombination der Warmwasserbereitung mit anderen Feuerstätten

Wenn Schmelkoks als Brennstoff zur Verfügung steht, spricht auch die Kombination der Warmwasserbereitung mit

anderen Feuerstätten besonders bei Küchenherden gute Wirtschaftlichkeit. Auf zwei solcher Lösungen, die in unserem Prüfstand entwickelt wurden und die sich bei Braunkohlenbriketts gut bewährt haben, sei hier hingewiesen. Bei Schmelzkoks ist mit einem noch günstigeren Ergebnis zu rechnen, weil er eine gleichmäßigere Wärmeentwicklung und einen für den praktischen Betrieb unbegrenzten Dauerbrand ermöglicht.

#### Nachgeschalteter Heizkessel im Herd mit offener Kochplatte

Die erste Lösung geht davon aus, daß die Hauptfunktionen des Herdes - das Kochen, Braten und Backen - durch vorhergehenden Entzug von Wärme für die Warmwasserbereitung nicht gestört werden dürfen. In dieser Hinsicht befriedigen andere Lösungen, bei denen z.B. Heizschlangen um die Herdfeuerung herumgelegt werden, nicht, weil sie einen großen Teil der Wärme aufnehmen, der dann für die ausreichende Beheizung der Kochplatte und des Bratofens fehlt. Außerdem muß bei größerem Bedarf an Warmwasser der Herd längere Zeit stark beheizt werden, auch wenn für andere Zwecke kaum noch Wärme benötigt wird.

Für die Warmwasserbereitung soll, damit sie in der Kombination wirtschaftlich ist, in erster Linie die Abfallwärme verwendet werden. In betriebschwachen Zeiten des Herdes soll dagegen die erzeugte Wärme möglichst voll für die Warmwasserbereitung nutzbar gemacht werden. Diese Forderungen werden in hohem Maße durch die in Abb. 19 a dargestellte Konstruktion erfüllt. Die Feuerung ist in der Herdmittle angeordnet. Bei normalem Betrieb des Herdes streichen die Verbrennungsgase unter der Herdplatte entlang, umspülen darauf den Bratofen und ziehen dann auf der anderen Herdseite durch einen aufsteigenden Zug des Wasserkessels zum Schornstein ab. Wenn Kochwärme nur in geringer Höhe benötigt wird, kann durch Umlegen

der Klappe K der Imbrand abgeschaltet und dafür der Sturzbug im Wasserkessel freigegeben werden. Entsprechend der höheren Temperatur der Verbrennungsgase, mit der sie jetzt in die Kesselzüge eintreten, steht auch die doppelt so große Kesselheizfläche zur Verfügung. Bei den ersten Ausführungen ließen wir die Herdkessel aus Stahlblech schweißen. Vorteilhafter ließen sie sich, wie Abb. 19 b zeigt, als gußeiserne Gliederkessel herstellen, da man bei ihnen freizügiger in der Formgebung ist und auf gleichem Raum eine größere Heizfläche unterbringen kann. Der Herdkessel wird mit einem Wärmetauscher durch Vor- und Rücklaufleitungen verbunden.

#### Heizschlange im Herd mit geschlossenem Kochraum

Die entgegengesetzte Lösung, nämlich die Heizschlange um die Feuerung zu legen, läßt sich beim Herd mit geschlossenem Kochraum anwenden. Die oben geschilderten Bedenken, daß dadurch die Beheizung des Herdes beeinträchtigt wird, besteht hier nur in geringem Maße, weil der Boden des Kochraumes unmittelbar von dem Glutbett angestrahlt wird und dadurch schon eine intensive Beheizung erfolgt. Die Wärme, die an die Heizschlange abgegeben wird, ist in diesem Falle natürlich keine Abfallwärme, sondern sie muß - wenigstens teilweise - zusätzlich erzeugt werden. Die Rostfläche ist daher entsprechend zu vergrößern. Da die Heizflächenbelastung der Schlange mit mindestens  $18\ 000\ \text{kcal/m}^2\text{h}$  anzusetzen ist und die feuerberührte Heizfläche etwa  $0,11\ \text{m}^2$  beträgt, ist der Rost um etwa  $100\ \text{cm}^2$  größer zu bemessen. Der Heizkessel wird wieder mit einem Wärmetauscher verbunden. Dieser kann entweder an beliebiger Stelle aufgehängt oder, wie es in Abb. 20 angegeben ist, auch mittelbar auf den Herd aufgesetzt werden. In diesem Falle hat man den Vorteil, daß er von den Rauchgasen im letzten Zug noch teilweise unspült und erwärmt wird.

- 42 -

e. Versorgung mehrerer Zapfstellen vom Badeofen aus

Die Bedeutung der Warmwasserversorgung wird noch vielfach verkannt und mitunter sogar als übertriebener Luxus abgelehnt. Um die vielseitige Verwendbarkeit der Badeöfen und Klein-Warmwasserbereiter für die Versorgung mehrerer Zapfstellen zu zeigen, seien kurz einige Beispiele gebracht. Dabei muß ausdrücklich betont werden, daß sowohl die Anlagekosten als auch der Betrieb selbst für einen minderbemittelten Haushalt tragbar sind. Wenngleich die Hinweise nur in losem Zusammenhang mit dem Thema stehen, sind sie doch angebracht, weil wegen der hervorragenden Eignung des Schmelkekeses für diesen Zweck gerade die Versorgung dieses Verbrauchssektors besonders verlockend erscheint.

Bekanntlich werden die Badeöfen und die nach dem gleichen Prinzip arbeitenden Klein-Warmwasserbereiter nur mit geringer Wandstärke hergestellt; sie sind daher nicht druckfest; infolgedessen dürfen sie nicht dem normalen Wasserleitungsdruck ausgesetzt werden. Der Warmwasserhahn der am Badeofen angebrachten Batterie verschließt aus diesem Grunde die Kaltwasser-Zuflußleitung zum Badeofen, während der Ausfluß stets offen bleibt. Beim Öffnen des Warmwasserhahnen wird dann kaltes Wasser in den Badeofen gedrückt und dieses verdrängt das im Badeofen befindliche warme Wasser, das durch eine von der Decke des Wasserzylinders abgehende Leitung je nach Stellung entweder aus dem Warmenahn oder der Brause ausläuft.

Anlagen mit Dreianschlußhahn

Wenn nun eine oder mehrere Zapfstellen vom Badeofen aus mitversorgt werden sollen, muß man für diese auch einen Dreianschlußhahn verwenden; eine Ausführungsform dafür gemäß einer Konstruktion des Verfassers zeigt Abb. 21 a.



Die Warmwasserleitung muß hinter jeder Zapfstelle nach oben abgesetzt werden, um zu verhindern, daß bei Öffnen einer vorhergehenden Zapfstelle das Wasser durch die stets offene Branseleitung herausfließt, Abb. 21 b. Die Montage einer derartigen Anlage ist verhältnismäßig schwierig, weil jede Zapfstelle drei Anschlüsse hat. Sie sollte daher nur angelegt werden, wenn außer dem Bad nur eine weitere Zapfstelle zu versorgen ist.

#### Anlagen mit Schwimmkugelgefäß oder Reduzierventil

Wesentlich einfacher gestaltet sich die Montage, wenn von vornherein eine Verminderung des Wasserleitungsdruckes auf ein für den Badeofenkörper zulässiges Maß vorgenommen wird. Je nach Bauart verträgt der Ofen einen Druck von 2 bis 5 m WS. Der Druck kann durch ein Schwimmkugelgefäß, das in die Wasserleitung vor den Badeofen eingebaut wird, vermindert werden, Abb. 22 a. Die für die Überwindung der Rohrleitungswiderstände verfügbare Druckhöhe ist dann durch den Abstand zwischen Wasserspiegel im Schwimmkugelgefäß und Zapfstelle gegeben. Noch einfacher gestaltet sich die Anlage, wenn statt des Schwimmkugelgefäßes ein Druckminderventil eingebaut wird, weil dann der Rohrleitungsplan genau so einfach wie bei der üblichen unter Leitungsdruck arbeitenden Warmwasserversorgung ist, Abb. 22 b. Ein zuverlässig arbeitendes Druckminderventil, das als Membranventil mit Federbelastung ausgebildet ist, wurde speziell für diesen Zweck von den Eschebach-Werken, Radeburg, entwickelt, Abb. 23.

#### Anwendbarkeit dieser Anlagen und Vorteile des Schwelkokes

Solche Klein-Warmwasserversorgungen sind im Betrieb sehr sparsam, weil sie einmal mit gutem Wirkungsgrad arbeiten und zum anderen ihr Betrieb den jeweiligen Bedürfnissen

- 44 -

bestens angepaßt werden kann. Zudem sind sie für die verschiedensten Zwecke geeignet: Im Haushalt für Bad, Waschtisch und Spülbecken, in gewerblichen Betrieben (Frisörgeschäften) und kleinen Fabriken für Heißenwaschanlagen usw. Es bedarf keiner nochmaligen Betonung, daß der Schmelkoks in diesen Anlagen wegen der bequemen Bedienung und des sparsamen Verbrauchs besonders vorteilhaft zu verwenden ist.

### III. Die Raumheizöfen

=====

#### a. Aufgaben der Öfen und ihre Haupttypen

##### Aufgaben

Während bei den bisher behandelten Feuerstätten die baulichen Anforderungen, die sich aus den Brenneigenschaften ergaben, bei den gasreichen Brennstoffen und dem sehr reaktionsfähigen Schmelkoks nahezu übereinstimmen, bestehen bei den Raumheizöfen in dieser Hinsicht wesentliche Abweichungen. Dort ergab sich aus dem üblichen Benutzungsgrad der Herde und Warmwasserbereiter die Forderung, die Wärmeerzeugung kurzzeitig auf volle Leistung zu bringen und sie dann je nach den vorliegenden Bedürfnissen allmählich abklingen zu lassen; hier soll die Wärme an den Raum entsprechend dessen Wärmeverlusten laufend abgegeben werden, so daß eine möglichst gleichbleibende Wärmeleistung des Ofens angestrebt wird. Wenn dort mitunter eine stärkere Wärmeerzeugung über längere Zeit erforderlich ist, wird Brennstoff zwar auch in kleinen Mengen, dafür aber häufig, aufgegeben, so daß das Prinzip der stets nur flach beschickten Planrostfeuerung mit den gleichen Vorbedingungen für eine gute Verbrennung der gasförmigen Bestandteile bei Kohlen und Schmelkoks

- 45 -

gewahrt bleibt. Bei den Heizöfen muß jedoch, da man ihre Bedienung nur ein oder wenige Male am Tage vornehmen will, die Wärme entweder in dem Brennstoffvorrat des Füllschachtes verfügbar gehalten oder, schon frei gemacht, in der Ausmauerung des Ofens gespeichert werden, so daß sie allmählich entsprechend der jeweiligen Außentemperatur an den Raum abgegeben werden kann.

### Speicherofen und Dauerbrandofen

Die beiden Ofenarten - der Speicherofen, als dessen typischer Vertreter der vom Töpfer gesetzte Kachelofen anzusehen ist, und der Dauerbrandofen, der überwiegend aus Gasseisen hergestellt wird - sind nebeneinander entwickelt worden und sind je nach den verfügbaren Brennstoffarten und örtlichen Gewohnheiten in Deutschland etwa im gleichen Umfange verbreitet. Der Speicherofen ist in erster Linie für die gasreichen Brennstoffe - Holz, Braunkohlenbriketts, auch jüngere, gashaltige, nicht backende Steinkohle - geeignet, während der Dauerbrandofen für die älteren, gasarmen Kohlen, HSKohle, Anthrazit und den durch Entgasung künstlich gealterten Brennstoff Koks - bevorzugt in Frage kommt.

### Eignung des Schmelkokes

Der Schmelkoks, in dem die besten Eigenschaften aller vorgenannten Brennstoffe vereinigt sind, läßt sich in den beiden Ofenarten mit mindestens dem gleichen Wirkungsgrad verfeuern wie die anderen Brennstoffe. (Vorausgesetzt wird nur verständnisvolle Bedienung, d.h. der Schmelkoks darf nicht in zu großer Schütthöhe aufgegeben werden, da dann wegen seiner hohen Reaktionsfähigkeit mit erheblichem Verlust an CO zu rechnen ist.) Trotz dieses Vorteils wird man unter den vorhandenen Typen der Heizöfen jene

auswählen, die den Brenneigenschaften des Schmelkokes am besten entgegenkommen und die im Hinblick auf Herstellungs- und Betriebskosten die wirtschaftlichste Lösung ergeben.

Der vom Töpfer gesetzte Kachelofen [2] ist dank seiner schweren Ausmauerung in der Lage, eine große Wärmemenge zu speichern und braucht daher selbst bei strenger Kälte nur ein- oder zweimal täglich aufgeheizt zu werden. Nachdem der Brennstoff ganz durchglüht und stark heruntergebrannt ist, wird der Ofen dicht geschlossen, so daß keine Wärme aus seinem heuerhitzten Innern mit durchströmender Luft in den Schornstein fortgeführt werden kann. Diese Art der Bedienung entspricht vor allem den Brenneigenschaften der gasreichen Brennstoffe, bei denen ein gleichmäßiger Abbrand wegen der Änderung der Zusammensetzung der brennbaren Substanz nur in beschränktem Maße möglich ist. Andererseits wäre es aber verfehlt (und es würde dem Gedanken des Speicherofens widersprechen), wollte man ihn im Dauerbrand betreiben, d.h. den aufgegebenen Brennstoff durch Drosseln der Verbrennungsluftmenge allmählich abbrennen lassen. Bei Verwendung von Schmelkoke in Kachelöfen müßte man aber dann den Hauptvorteil dieses Brennstoffes, nämlich seinen regelbaren Dauerbrand von vornherein aufgeben. Im Kachelofen bietet er daher gegenüber den anderen gasreichen Brennstoffen keine überzeugenden Vorteile. Da er, bezogen auf die Heizleistung, wesentlich teurer als der eiserne Ofen ist, wäre es in keiner Weise gerechtfertigt, den Kachelofen für die Verwendung von Schmelkoke umzu konstruieren.

Hingegen entspricht der Dauerbrandofen sehr dem Wesen des Schmelkokes. Die Wärmespeicherfähigkeit des Dauerbrandofens ist gering, weil er entweder gar nicht ausgemauert oder nur insoweit mit Schamottesteinen ausge-



füttert ist, wie es zum Schutze des Eisenmantels erforderlich erscheint. Die durch den Brennstoffabbrand freige machte Wärme wird also ohne große Verzögerung an den Raum abgegeben. Die Homogenität in der Zusammensetzung der brennbaren Substanz beim Schmelkoks ermöglicht es, den Abbrand dem Heizbedürfnis genauestens anzupassen und eine zeitweilige Übererwärmung des Raumes zu vermeiden. Besonders wichtig ist dies für die Übergangszeiten, in denen die Außentemperaturen über und um 0° liegen und der Heizbedarf entsprechend niedrig ist. Hier treten die Ersparismöglichkeiten bei Verwendung von Schmelkoks gegenüber anderen, nicht so reaktionsfähigen Brennstoffen am stärksten in Erscheinung. Beim Hochtemperaturkoks kann beispielsweise die Abbrandgeschwindigkeit bei weitem nicht so stark gedrosselt werden, ohne daß die Gefahr des Erlöschens besteht. Wenn man bei ihm auf sparsamen Verbrauch in der Übergangszeit Wert legt, bleibt nur übrig, auf die Annehmlichkeit des ununterbrochenen Betriebes zu verzichten und den Ofen täglich neu für einige Stunden anzuheizen.

#### b. Die eisernen Dauerbrandöfen

##### Bauart der Dauerbrand- und Unterbrandöfen

Bei den Dauerbrandöfen wird nach der Feuerungsweise zwischen Durchbrand- und Unterbrandöfen unterschieden. Bei der ersten Art wird der in den Füllschacht aufgebene Brennstoffvorrat allmählich von unten nach oben verbrannt. Die Verbrennungsgase brennen also durch den Brennstoffvorrat hindurch. Bei der Unterbrandöfen (Abb. 24 a und b) findet die Verbrennung außerhalb des Füllschachtes auf dem Rost statt. Der bevorratete Brennstoff rutscht entsprechend dem Abbrand aus dem Füllschacht nach.

Eignung für den Schmelkoks

Auch hier erhebt sich wieder die Frage, welche Feuerungsweise - Durchbrand oder Unterbrand - für den Schmelkoks zweckmäßiger ist. Auszugehen ist dabei von der Tatsache, daß der Schmelkoks sehr reaktionsfähig ist und daß daher, wenn er in zu hoher Schicht, vor allem bei angestregter Leistung, verfeuert wird, mit größeren Rauchgasverlusten infolge unvollkommener Verbrennung zu rechnen ist. In dieser Hinsicht ist die Auswirkung beim Schmelkoks ähnlich wie bei den gasreichen Brennstoffen, bei denen in der Entgasungsperiode auch ein nicht restloser Ausbrand der Schmelprodukte in Kauf genommen werden muß. In den Baubestimmungen für eiserne Dauerbrandöfen und Einsätze [3], die, ebenso wie die früher schon erwähnten für Dauerbrandherde, bezwecken, die Qualität der fabrikmäßig hergestellten Öfen zu heben, ist darauf insofern Bedacht genommen, daß als nutzbare Füllschachthöhe nur  $2/3$  der Höhe zwischen Rost und Ofendecke eingesetzt ist. Es ist also noch ein ausreichender Verbrennungsraum vorhanden. Damit bei der Bedienung durch Laien eine zu hohe Füllung verhindert wird, haben auf Anregung der Braunkohlenindustrie die meisten Hersteller bei ihren eisernen Öfen schon in etwa  $2/3$  Höhe der Vorderwand die Fülltüren angebracht. Für den Schmelkoks ist diese konstruktive Maßnahme auch sehr wichtig, zumal er wegen seiner durchschnittlich kleineren Korngröße ziemlich dicht lagert und dadurch die Gefahr des Luftmangels bei der Verbrennung erhöht wird.

Mit zunehmendem Abbrand verringert sich die Brennstoffschicht in Füllschacht, die Leistung sinkt allmählich ab und wegen des zunehmenden Luftüberschusses verschlechtert sich auch der Wirkungsgrad. In dieser Hinsicht sind die Unterbrandöfen für den Schmelkoks den Durchbrandöfen

- 49 -

erheblich überlegen. Neben den allbekannten Anthrazit-Dauerbrandöfen sind auch die für andere bitumenhaltige Kohlen (stückige Braunkohlen und nichtbackende Gasflammenkohle) entwickelten Unterbrandöfen für den Schmelzkoks sehr gut geeignet.

#### e. Bauliche Einzelheiten beim Durchbrandofen

Auf Einzelheiten der konstruktiven Ausbildung der Dauerbrandöfen für Schmelzkoks soll hier nur insoweit eingegangen werden, als sie nach den Versuchsergebnissen besondere Beachtung verdienen. Im übrigen sind alle grundsätzlichen konstruktiven Forderungen in den "Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für eiserne Dauerbrandöfen und eiserne Dauerbrandeinsätze" bereits niedergelegt. Zudem kann die Konstruktion der eisernen Dauerbrandöfen, die in gegenseitigen Wettbewerb der Firmen dauernd verbessert werden, als recht ausgereift gelten.

#### Größe und Form des Rostes, Stehplatte

Es ist besonders wichtig, die Größe und die Form des Rostes festzulegen. In den erwähnten BGP ist der Begriff "Nennrostfläche" eingeführt. Dieser Begriff entspricht bei Durchbrandöfen dem mittleren Querschnitt des Füllschachtes, bei Unterbrandöfen mit Planrost der Gesamtrostfläche und bei solchen mit Korbrost dessen oberem lichten Querschnitt. Diese Definition ist mit Bedacht gewählt, weil bei den Durchbrandöfen die Verbrennung sich über den ganzen Schachtquerschnitt erstreckt, dieser also gewissermaßen die Gesamtrostfläche darstellt. Eine stärkere Kinschnürung des Füllschachtes in Rosthöhe ändert an den Verhältnissen nichts, sondern beeinträchtigt nur die Luftverteilung über das ganze Brennstoffbett und verschlechtert die Entaschungsmöglichkeit. Es er-

- 50 -

scheint infolgedessen angebracht, die tatsächliche Restfläche nicht wesentlich kleiner auszuführen.

Die Form des Rostes läßt häufig noch manche Forderungen unerfüllt, die gerade für den Schmelzkoks wichtig erscheinen. Im allgemeinen wird der Rost als Teller-Rüttelrost ausgeführt. Oft ist aber der Teller so klein, daß es trotz längeren Rüttelns nicht gelingt, die Asche zu entfernen. Knaggen, gemäß Abb. 25 a, die über den feststehenden Teil des Rostes übergreifen und die Asche aus den Ecken räumen sollen, stellen auch keine besonders gute Lösung dar, weil bei weniger stückfestem Koks der Verlust durch Abrieb zu groß wird. Die günstigsten Verhältnisse erhält man bei den Durchbrandöfen, wenn man einen Mundrost, dessen Durchmesser etwas größer als der Schachtquerschnitt ist, einbaut und mit Fernsteinen den rechteckigen Schachtquerschnitt oberhalb des Rostes in einen Kreisquerschnitt überführt, Abb. 25 b. Die ganze Brennstoffkule ruht dann nur auf dem beweglichen Teller. Wenige schwache Bewegungen genügen, die Asche vom Rost abregnen zu lassen. Wichtiger ist jedoch noch, das ganze Glutbett schonend zu bewegen, wodurch die an den einzelnen Koksstückchen anhaftende Asche abgestreift wird. Durch das damit verbundene Zusammensacken der Glut wird die Koksglut neu belebt. Etwa gleichwertig ist die in Abb. 25 c angegebene Rostform, bei der der Gaskranz an festen Teil des Rostes fortgelassen ist, so daß der Teller bis an den Rand des Schachtes reicht. Andere ebenfalls befriedigende Formen sind viereckige Schüttelroste, deren Drehpunkt meistens in der Mitte liegt. Diese Roste müssen jedoch weit genug unter einen Rahmen untergreifen, damit beim Schütteln an den Ecken keine Spalten freigegeben werden, in denen sich Koksstückchen festklemmen können.



In der Regel wird jetzt bei eisernen Öfen statt gesonderter Feuer- und Aschentür eine größere Tür eingebaut, durch die sowohl der Feuer- als auch der Aschenraum zugänglich ist, a in Abb. 26. Der Feuerraum ist vorn durch eine Stehplatte abgeschlossen, die den Eintritt von Luft in den Feuerraum oberhalb des Restes verhindern soll, b in Abb. 26. Dieser Zweck kann aber nur erfüllt werden, wenn die Stehtür allseitig gegen einen übergreifenden Rahmen, c in Abb. 26, schlägt. Häufig ist darauf nicht Bedacht genommen. Für Schmelkokks äußert sich das dann sehr nachteilig, weil das Feuer schief brennt und eine genaue Regelung der Verbrennungsleistung unmöglich wird. Außerdem wird durch den ungleichmäßigen Brand die Gefahr der Schlackenbildung erhöht.

#### Zugführung

Von untergeordneter Bedeutung ist es, ob die Durchbrandöfen für Schmelkokks nur mit Deskenzügen oder mit Sturz- und Steigzügen ausgestattet werden. Angesichts der hohen Reaktionsfähigkeit des Schmelkokkes wirkt sich jedoch der höhere Widerstand der Sturzzugöfen auf die Gleichmäßigkeit des Abbrandes günstig aus, er stellt eine wirksame Bremse gegen das "Durchgehen" des Schmelkokkes bei starkem Schornsteinzug dar.

#### Dichte Ausführung

Daß auch bei den eisernen Dauerbrandöfen die Dichtigkeit in allen Teilen für die wirtschaftliche Verfeuerung des Schmelkokkes von ausschlaggebender Bedeutung ist, bedarf nach den früheren Ausführungen keiner besonderen Betonung. Die dort vorgeschlagenen konstruktiven Maßnahmen gelten sinngemäß auch für die Dauerbrandöfen.

- 52 -

Maßnahmen zur Stubenreinheit

Bei Aufstellung der Heizöfen in Wohnräumen ist der Stubenreinheit erhöhte Bedeutung beizumessen. Weder beim Nachfüllen von Schmelzkoks, noch beim gelegentlichen Rütteln des Rostes und erst recht nicht beim Entleeren des Aschenkastens darf Schmutz in der Umgebung des Ofens entstehen. Das Herausfallen von Kokestückchen oder Grus beim Beschießen wird verhindert, wenn die untere Lärge der Falltür nach innen abfällt. Bei Klapptüren empfiehlt es sich, am Türinnern eine drehbare Klappe anzubringen, wie dies bereits früher (s in Abb. 17) vorgeschlagen wurde. Die Rüttelvorrichtung muß von außen bequem zu betätigen sein, ohne daß ein Öffnen der Aschentür erforderlich ist. Der Aschenkasten muß genügend groß sein. Sein Inhalt muß je  $1 \text{ m}^2$  Heizfläche mindestens 3,5 l betragen, damit er auch bei aschereichen Schmelzkoks die anfallende Asche bequem fassen kann. Vor allem ist es wichtig, daß er, ganz in den Aschenraum eingeschoben, vorn bis an die Tür reicht, damit aus dem Feuerraum keine Asche vor den Kasten fallen kann, d in Abb. 25.

d. Bauliche Einzelheiten bei UnterbrandöfenUnterbrandöfen für Anthrazit

Von den Dauerbrandöfen mit unterem Abbrand ist der für Anthrazit am weitesten verbreitet, Abb. 24 b. Er ist, wie Versuche auf dem Prüfstand und in der Praxis ergeben, für Schmelzkoks sehr gut geeignet. Es ist jedoch unbedingt darauf zu achten, daß der Füllschacht absolut dicht ist. Der Füllschachtdeckel, c in Abb. 24, der vielfach als Schließdeckel ausgeführt ist, muß aufgeschliffen sein und gut auf dem Rahmen angepreßt werden können. Ebenso muß

- 53 -

der Füllschacht gegen den Feuerraum dicht sein, d in Abb. 24 b. Trifft dies nicht zu, dann brennt der Schmelke in dem Schacht hoch; dadurch wird jede Regelung der Leistung unmöglich gemacht, und außerdem muß damit gerechnet werden, daß der Ofen durch die auftretenden hohen Temperaturen beschädigt wird.

### Unterbrandöfen für verschiedene Brennstoffe

In den letzten Jahren sind auch für gasreiche, nicht-backende Kohlen Unterbrandöfen entwickelt worden, Abb. 24 a. Bei ihnen ist der Füllschacht im Gegensatz zum Anthrazit-Unterbrenner nicht in der Mitte, sondern im Vorderteil des Ofens angeordnet. Dadurch wird zwar ein beachtlicher Teil der Ofenoberfläche als voll wirksame Heizfläche ausgeschaltet, man erreicht dadurch aber, daß der Füllschacht nicht so stark beheizt wird und die Vorentgasung des Brennstoffes eingedämmt wird. Für den Schmelke ist diese Überlegung nicht von so großer Bedeutung wie für die gasreichen Kohlen. Die Abmessungen des Füllschacht-Auslaufes, die Zuführung von Zweitluft in den Steigzug vom Aschfall aus haben sich aber auch für die vollkommene Verbrennung gut bewährt. Es ist wohl kaum damit zu rechnen, daß diese Konstruktion, so groß auch das technische Bedürfnis nach einer derartigen Lösung ist, allgemeinen Anklang finden wird, weil gerade die Vorderseite des Ofens nur teilweise zur Wärmeabgabe beiträgt.

### e. Die Dauerbrandeinsätze

Diese Bedenken gelten weniger, wenn man die Konstruktion auf die Dauerbrandeinsätze, die zur Steigerung der Wärmeleistung in Kachelöfen eingebaut werden, anwendet. Der Einsatz hat hier in erster Linie die Aufgabe zu erfüllen,



durch allmählichen Abbrand des Brennstoffes gleichmäßig Wärme zu erzeugen, die zu einem Teil den nachgeschalteten Kachel- oder Eisenschmelzflächen zur Abgabe an die zu beheizenden Räume zugeleitet wird. Die Wärmeabgabe des Einsatzes selbst kann dahinter zurücktreten. Die Einsätze waren früher meistens nach dem Durchbrandprinzip gebaut und für die Verwendung von Hochtemperaturkoks eingerichtet. Da aber selbst bei diesem die Regelung der Leistung, besonders im unteren Bereiche zu wünschen übrig ließ, ging man dazu über, Einsätze mit unterem Abbrand zu bauen, Abb. 27. Für die Verfeinerung von Schmelzkoks sind diese nicht sonderlich geeignet, weil der Abstand Rost bis Unterkante Füllschacht, Abb. 27a und damit auch die Glühschicht bei Schmelzkoks zu hoch ist, so daß der Verlust an CO recht groß wird. Diese Konstruktionen gaben aber die Anregung, einen Unterbrandeinsatz für Schmelzkoks zu entwickeln. Wir lehnten uns dabei an eine Konstruktion der Fa. Pirwitz, Rügenwalde, an, die als Mantel für den aus Schamottesteinen gebauten Einsatz Stahlblechlamellen verwendete und dadurch eine sehr elastische Bauweise erzielte, Abb. 27b. Die einzelnen Maße für den Übergangsquerschnitt vom Füllschacht zum Steigzug, c in Abb. 27 b, Querschnitt der Zweitluft, d in Abb. 27b, Rostgröße, e in Abb. 27b, sind der Skizze zu entnehmen. Erwähnt sei nur, daß bei einer Leistung von  $4000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$  bei vollkommener Verbrennung ein  $\text{CO}_2$ -Gehalt von fast gleichbleibend 15 bis 16 % über jeweils 8 bis 10 Stunden erhalten wurde und daß er in den dazwischen liegenden Stunden mit geringer Leistung nicht unter 11 bis 12 % absank.

### 1. Die keramischen Dauerbrandöfen

Zum Abschluß sei noch ein kurzer Blick auf das Gebiet der ortsbeweglichen keramischen Öfen geworfen, um auch dort die Aussichten für die Verwendungsmöglichkeiten des

Schwelkokses zu untersuchen. Bisher beschäftigten sich nur wenige Firmen mit der Herstellung von keramischen Öfen. Erst der Mangel an Eisen zwang dazu, hierauf zurückzugreifen. Um Ordnung in dieses am wenigsten übersichtliche Gebiet zu bringen, wurden von den daran interessierten Stellen ebenfalls "Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für ortsbewegliche keramische Dauerbrandöfen" [4] aufgestellt. Eine Anzahl der darin enthaltenen Bestimmungen konnte jedoch noch nicht so scharf gefaßt werden wie bei den anderen Feuerstätten, weil die Erfahrungen noch zu weit auseinander gingen [5]. Die größere Freizügigkeit (~~Übers. Freiheit~~) bei der Gestaltung des Innenausbaus, die dadurch möglich ist, daß die Heizflächenbelastung in einem größeren Bereich frei gewählt werden kann, läßt Konstruktionen zu, die auch für den Schwelkoks gut geeignet erscheinen. Eine davon zeigt Abb. 28. Sie stellt einen Unterbrandofen mit beidseitigem Abbrand dar. Gegenüber dem früher beschriebenen Ofen mit einseitigem Steigzug, Abb. 24 a, weist er den Vorteil auf, daß praktisch die ganze Oberfläche an der Wärmeabgabe beteiligt ist. Die Abmessungen des Überganges aus dem Füllschaft in die Steigzüge sowie die der Zweitluftquerschnitte, die sich für Schwelkoks als am günstigsten gezeigt haben, sind aus der Skizze ersichtlich.

#### C. Zusammenfassung

=====

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst die Eigenschaften des Schwelkoses, die sich nach Versuchen auf dem Prüfstand und in der Praxis als besonders wichtig und vorteilhaft für seine Verwendung in den Feuerstätten des Hausbrandes erwiesen hatten, behandelt. Anschließend wurde dann näher auf die grundsätzlichen Forderungen, die der Betrieb der Feuerstätten im besonderen bei Verwen-

dung von Schmelzkoks verlangt, eingegangen. Im Hauptteil wurde dann eine Übersicht über die einzelnen Feuerstätten selbst und ihre bauliche Anpassung an die Eigenschaften des Schmelkokses gegeben. Bei jedem Teilgebiet wurde hier auf die Konstruktion, die als besonders günstig für die Verwendung von Schmelkoks anzusehen ist, hingewiesen.

Als Ergebnis der Arbeit ist zusammenfassend festzustellen, daß der Schmelkoks wie kein anderer Brennstoff dazu fähig ist, die Anforderungen auf allen Teilgebieten des Hausbrandes in idealer Weise zu erfüllen. Dank seiner nicht zu übertreffenden günstigen Brenneigenschaften gewährleistet er eine bis dahin nicht erreichte Wirtschaftlichkeit des Brennstoffverbrauchs der Feuerstätten; ferner bietet er der Hausfrau, weil sie die Feuerstätten spielend im Dauerbetrieb halten kann, große Arbeitserleichterung und Bequemlichkeit. Es ist daher damit zu rechnen, daß der stückige Schmelkoks, wenn er erst einmal in guter Qualität und Klassierung und in ausreichenden Mengen auf dem Markt verfügbar ist, leichten Absatz finden wird und daß für ihn auch gern ein höherer Preis geboten wird, als seinem Heizwert gegenüber anderen Brennstoffen entspricht. Dies wird mit dazu beitragen, die Kosten des Schmelprozesses günstig auf die einzelnen Produkte zu verteilen und damit die Treibstoffgewinnung durch Schmelzung zu fördern.

gez. Odo Weimann  
Dipl.Ing.

S c h r i f t t u m

- [1] Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für Dauerbrandherde aus Stahlblech  
Hrsg. Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft E.V., Berlin 19, Frank'sche Verlagsbuchhandlung.
- [2] Reichsgrundsätze für Kachelofen- und Kachelherdbau.  
6. völlig umgearb. Aufl.  
Hrsg. Reichsinnungsverband des Töpfer- und Ofensetzerhandwerks. Berlin 19, Verlag Albert Lüttke.
- [3] Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für eiserne Dauerbrandöfen und eiserne Dauerbrandeinsätze.  
Hrsg. Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft E.V. Berlin 19, Frank'sche Verlagsbuchhandlung.
- [4] Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen für ortsbewegliche keramische Dauerbrandöfen.  
Hrsg. Reichsarbeitsgemeinschaft für Wärmewirtschaft E.V. Berlin 19, Frank'sche Verlagsbuchhandlung.
- [5] Weimann, O.: Der ortsbewegliche keramische Dauerbrandofen nach den Bau-, Güte- und Prüfbestimmungen.  
Wärmewirtschaft Bd. 14 (1941),  
S. 41/42.

# Verzeichnung der Abbildungen und ihrer Unterschriften

-----

**Abb.1** Ausbildung des Regelquerschnittes bei häuslichen Feuerstätten

- a. Unzureichende Form: Regelkante der Luftöffnung geradlinig.
- b. und c. Günstigere Form: parabelförmige Vergrößerung des Querschnitts im unteren Bereich; Begrenzungskante der Regelöffnung parabelförmig

**Abb.2** Haupttypen von Kochherden.

- a. Herd mit offener Kochplatte und Sonderfeuerung für den Bratofen
- b. Herd mit offener Kochplatte und Beheizung des Bratofens von der Herdfeuerung aus (Umbrandherd)
- c. Herd mit geschlossenem Kochraum.

**Abb.3** Kochwirkungsgrade  $\eta$  bei verschiedenen Brennstoffen in Herden mit offener Kochplatte und geschlossenem Kochraum in Abhängigkeit von der Gesamtheizleistung  $Q$  der Herde.

- a. Schmelzkoks in Herd mit geschlossenem Kochraum
- b. Steinkohle in Herd mit geschlossenem Kochraum
- c. Schmelzkoks in Herd mit offener Kochplatte
- d. Steinkohle in Herd mit offener Kochplatte

**Abb.4** Umbrandherd mit Mittelfeuerung.

- a. Längsschnitt
- b. Grundriß

**Abb.5** Stufendiagramm: Querschnittlänge der Rauchgaszüge bei einem Umbrandherd

**Abb.6** Umbrandherd mit tiefem Wasserkessel. Bratofen gegen Wasserkessel durch Trennwand abgeschirmt.

**Abb.7** Ausführungsformen von Bratöfen für Herde mit offener Kochplatte.

- a. Bratofen mit ausziehbarem Bodenblech
- b. Dichtung des Bodenbleches durch Einlage eines Asbeststückes
- c. Bratofen mit eingelegter gußeiserner Bodenplatte
- d. Vollkommen geschlossener Bratofen, Reinigungstür unter dem Bratofen
- e. Doppelte Bratofendecke zur Vermeidung zu starker Oberhitze
- f. Breitere, niedrigere Form des Bratofens günstiger als höhere und schmälere.

**Abb.8** Frontplatte mit Feuer- und Aschentür für Kochherde.

- a. Umlaufender Falz am Rahmen für Kittfalz
- b. Dichtflächen an Tür und Rahmen geschliffen
- c. Kittfalzdichtung mit schwalbenschwanzförmigem Nut
- d. Kittfalzdichtung mit kreisförmigem Nut
- e. Kittfalzdichtung bei Stahlblechtür
- f. Luftregelschieber unter einer Haube der Aschentür verdeckt
- g. Schutzplatte in Feuertür über ganze Fläche reichend
- h. Knebelverschluß

**Abb.9** Maßnahmen zur Abdichtung der Herdplatten.

- a. Ungenügende Abdichtung bei einfacher Überlappung
- b. Dichtung zwischen Plattenrahmen und Blechwänden des Herdes durch Einlage eines Asbeststreifens
- c. Falzdichtung zwischen Rahmen und Einleger
- d. Falzdichtung zwischen Einleger und Kochlochdeckel
- e. und f. Strömungstechnisch günstige Ausbildung der Falzdichtung
- g. Zapfen zur Vergrößerung der wärmeaufnehmenden Fläche auf der Unterseite des Kochlochdeckels

**Abb.10** Umstellklappe für Umbrandherde.



- a. Arretierung in Endstellungen der Klappe
- b. Verbesserung der Dichtung durch Anbringen von Rippen an der Umstellklappe

Abb. 11 Feuerung eines Herdes mit offener Kochplatte.

- a. Rost in Herdmitte gelegen
- b. Rostvorlage
- c. Rost als Schieberrost ausgebildet
- d. Roststäbe gewellt zwecks besserer Entaschung
- e. Ascheleitbleche unter dem Rost

Abb. 12 Herd mit geschlossenem Kochraum (Schrankherd) der Firma Briel, Reutlingen

- a. Wände des Kochraumes aus 10 mm starken keramischen Spezialplatten
- b. Außenwände aus 50 mm starken keramischen Spezialplatten
- c. Feuerung in Herdmitte

Abb. 13 Schrankherd mit seitlich angeordneter Feuerung und daneben befindlichem Wasserkessel.

- a. Vorderansicht
- b. senkrechter Schnitt

Abb. 14 Schrankherd mit Feuerung in der Mitte der Frontseite und Wasserkessel in der Herdecke

Abb. 15 Ausführungsform des Kochraumes für einen Schrankherd.

Abb. 16 Typen von Badeöfen.

- a. Badeofen mit Feuerungsuntersatz und darüber befindlichem Wasserkessel
- b. Feuerung im Wasserraum eingebaut

Abb. 17 Badeofen-Untersatz.

- a. Falltür mit Knebelverschluss
- b. Schutzplatte in Falltür
- c. Klappe an Falltür



**Abb. 18** Vergrößerung der Heizflächen von Badeöfen

- a. Flammrohr gewellt
- b. Flammrohr schraubenartig gewunden
- c. Feuerung im Warmwasserbehälter eingebaut, Steigzug und steigender Zug
- d. desgl. mit zwei steigenden Zügen

**Abb. 19** Umbrandherde mit Mittelfeuerung und nachgeschalteten Wasserkessel

- a. Kessel aus Stahlblech geschweißt
- b. Gußeiserner Kessel aus Gliedern zusammengesetzt

**Abb. 20** Herd mit geschlossenem Kochraum und einer um die Feuerung angeordneten Heisschlange.

- a. Heisschlange
- b. Wasserbehälter
- c. Kochraum

**Abb. 21a** Dreianschlußhahn für Warmwasserversorgung vom Badeofen aus.

- d. Anschluß der Kaltwasser-Druckleitung
- e. Anschluß für Kaltwasserleitung zum Badeofen
- f. Anschluß für Warmwasserleitung vom Badeofen

**Abb. 21b** Schaltschema für Warmwasserversorgung zweier Zapfstellen vom Badeofen aus unter Verwendung eines Dreianschlußhahnes f.

**Abb. 22a** Schaltschema für Warmwasserversorgung vom Badeofen aus unter Verwendung eines Schwimmkugelgefäßes

- c. Schwimmkugelgefäß
- d. Kaltwasser-Druckleitung
- e. Kaltwasserleitung zum Badeofen
- f. Warmwasserleitung vom Badeofen
- g. Ausdehnungsleitung
- h. Überlaufleitung

Abb. 22

Schaltchema für Warmwasserversorgung von einem Klein-Warmwasserbereiter aus unter Verwendung eines Reduzierventils

Abb. 23

Druckminderventil für Warmwasserversorgung vom drucklosen Warmwasserbereiter aus.

- k. Anschluß für Druckwasserleitung
- l. Austritt des Wassers mit vermindertem Druck
- m. Ventilteller
- n. Gummi-Membrane
- o. Druckfeder

Abb. 24a

Unterbrandofen für Anthrazit (linke Abb.)

- c. Gutes Aufsitzen des Füllschachtdeckels
- d. Abdichtung des Füllschachtes gegen Feuerraum

Abb. 24b

Unterbrandofen für gasreiche Kohlen

Abb. 25

Rostformen für eiserne Dauerbrandöfen

- a. Teller-Rüttelrost mit Eckenräumern
- b. Großer, den ganzen Feuerraumquerschnitt einnehmender Teller-Rüttelrost
- c. Großer Teller-Rüttelrost, bei dem am Rostrahmen der Gußkranz fortgelassen ist

Abb. 26

Unterteil eines guten eisernen Dauerbrandofens

- a. Kombinierte Feuer-Aschentür, Luft-Regelschieber oberhalb des Rostes
- b. geschlossene Stehplatte
- c. Über Stehplatte übergreifender Rahmen
- d. Die ganze Ofentiefe einnehmender Aschenkasten

Abb. 27

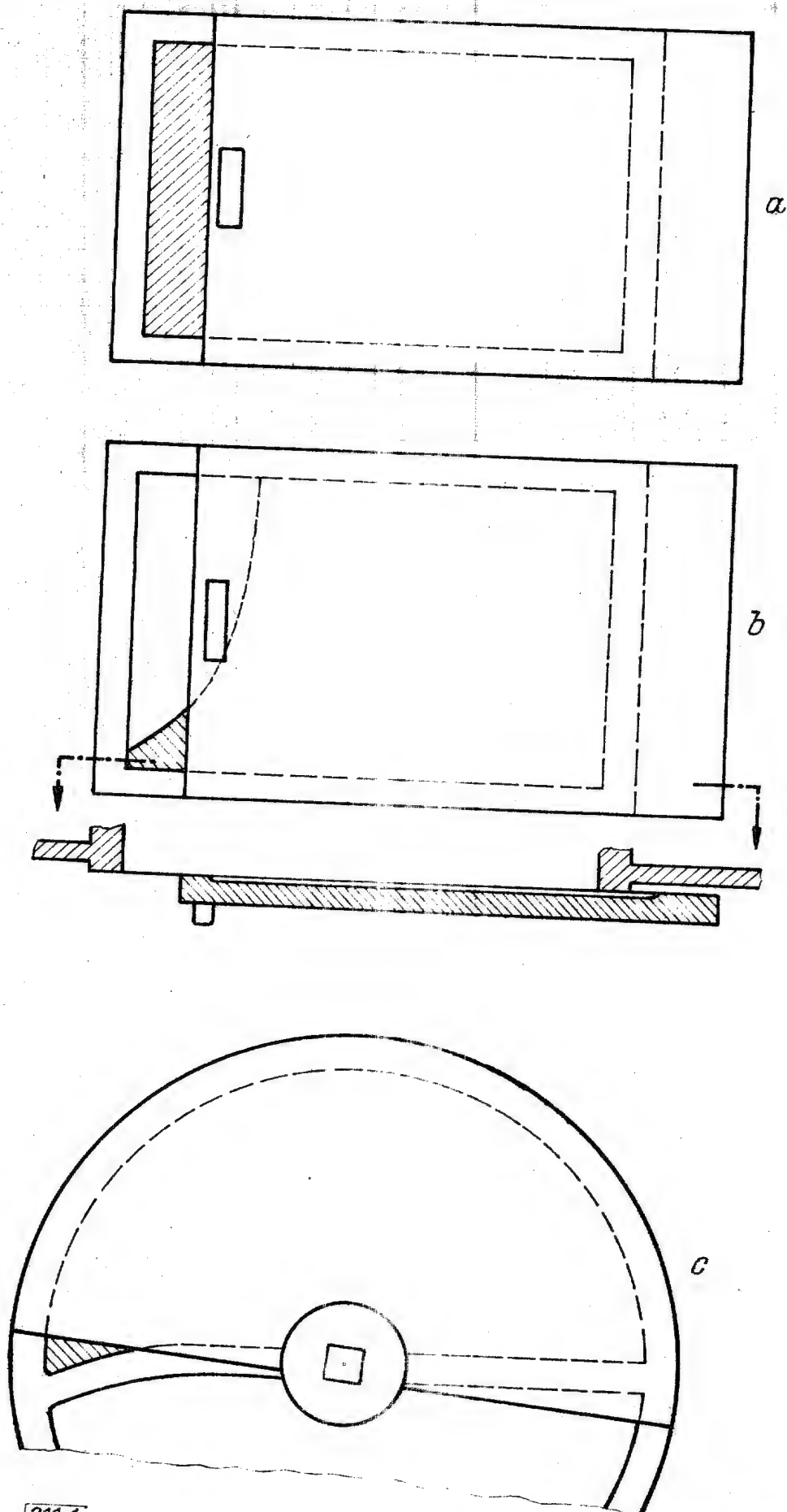
Dauerbrandsätze mit unserem Abbrand für Kachelöfen

- a. Einsatz für Gaskoks
- b. Einsatz für Schmelzkoks

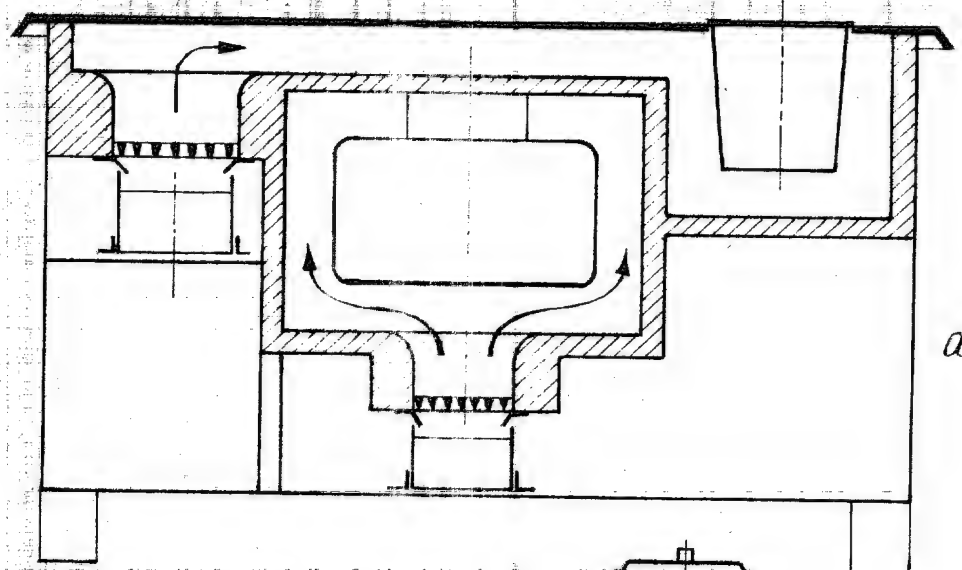
- c. Höhe des Übergangsquerschnittes vom Feuerraum zum Steigung max 80 mm
- d. Querschnitt der Zweitluftöffnung  
10 x 50 mm
- e. Rostgröße 240 x 240 mm<sup>2</sup>

Abb. 28

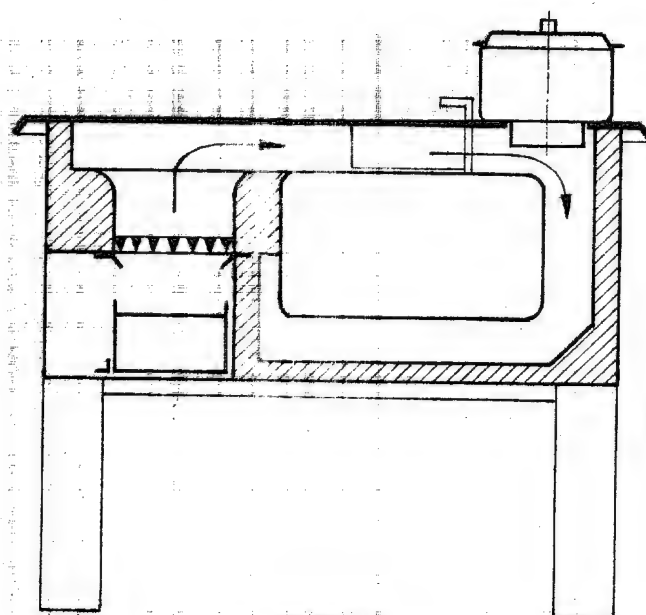
Keramischer Dauerbrandofen mit unterem Abbrand  
und beidseitigem Steigung für Schmelzkoks



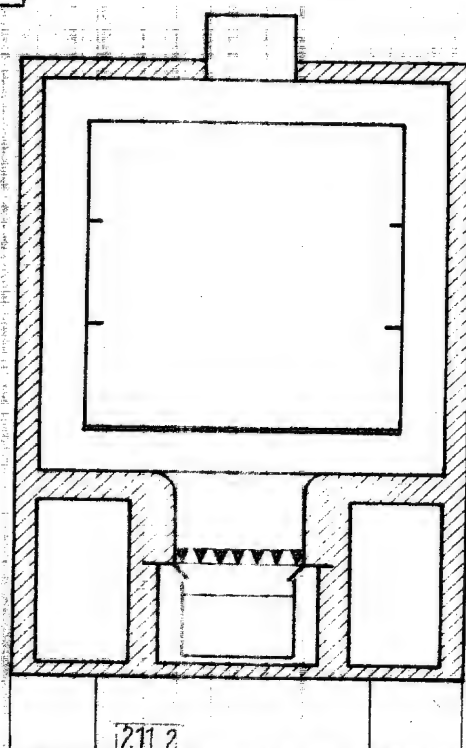
211.1



*a*



*b*



*c*

211.2

Abb. 2 Рис. 2

000000

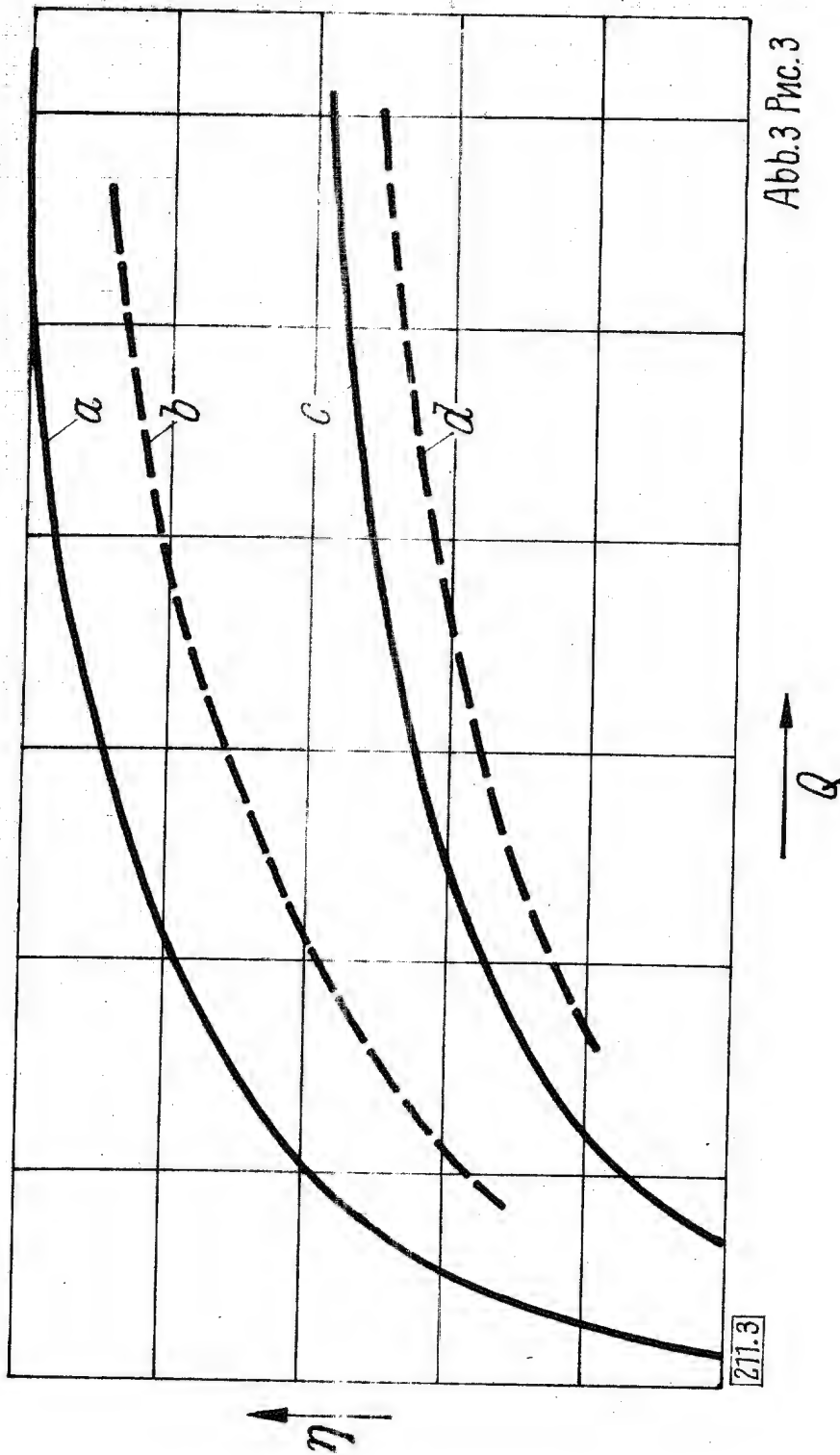


Abb.3 Рис.3



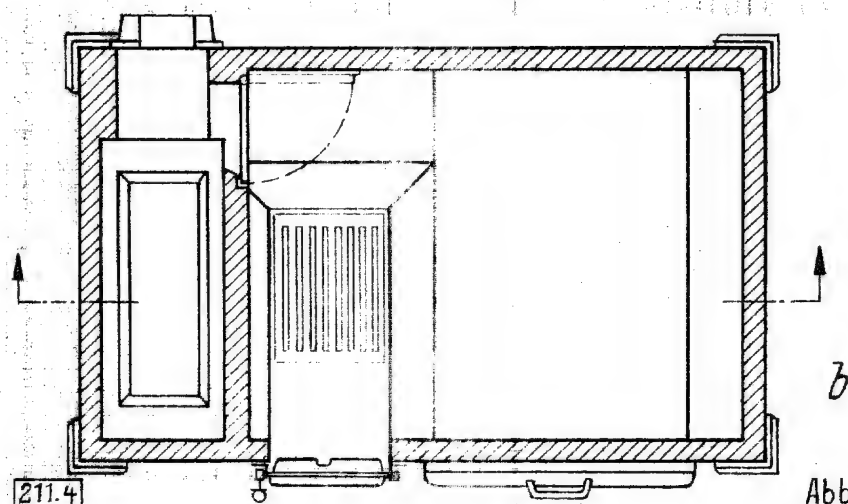
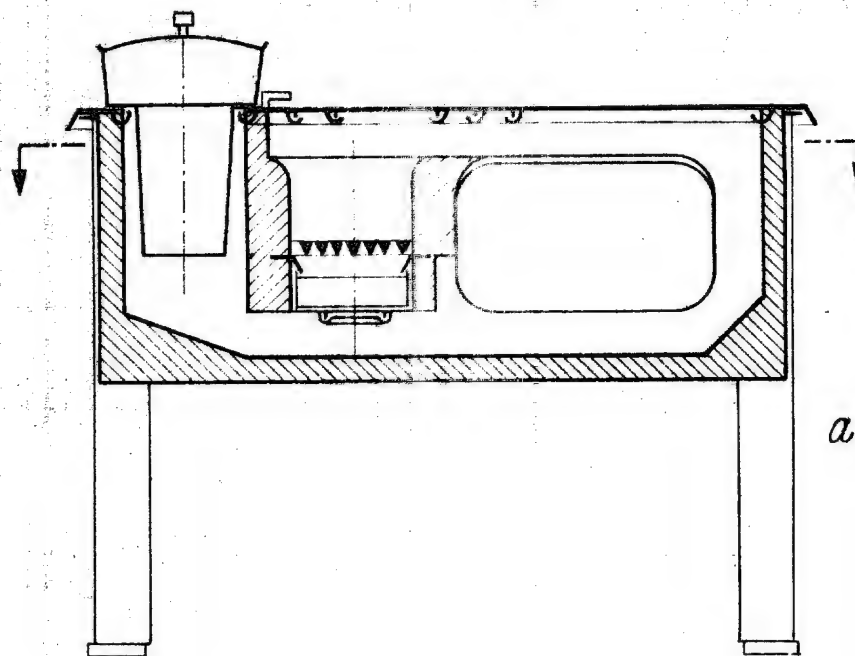


Abb.4 Рис.4

211.4

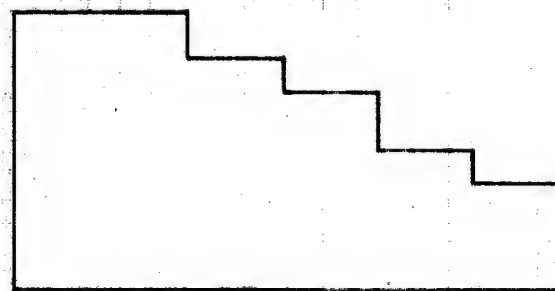


Abb.5 Рис.5

211.5

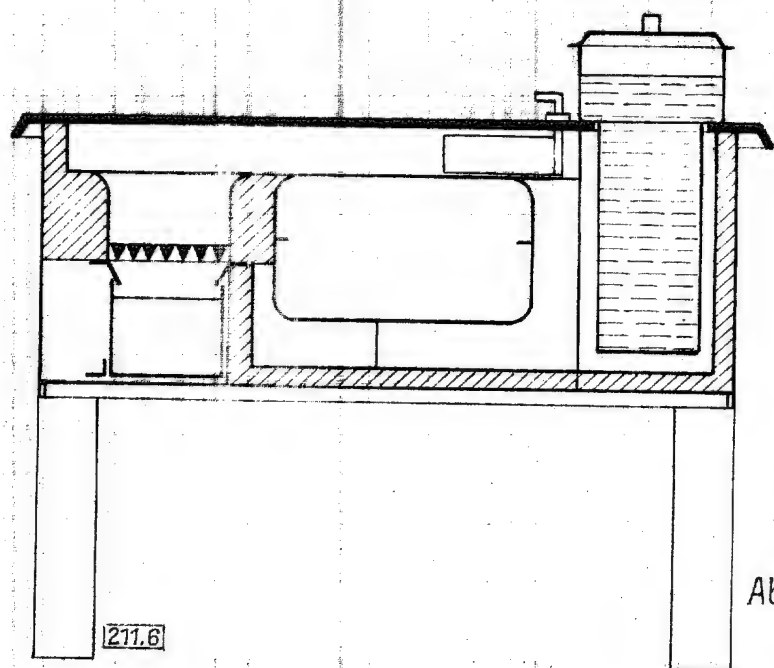
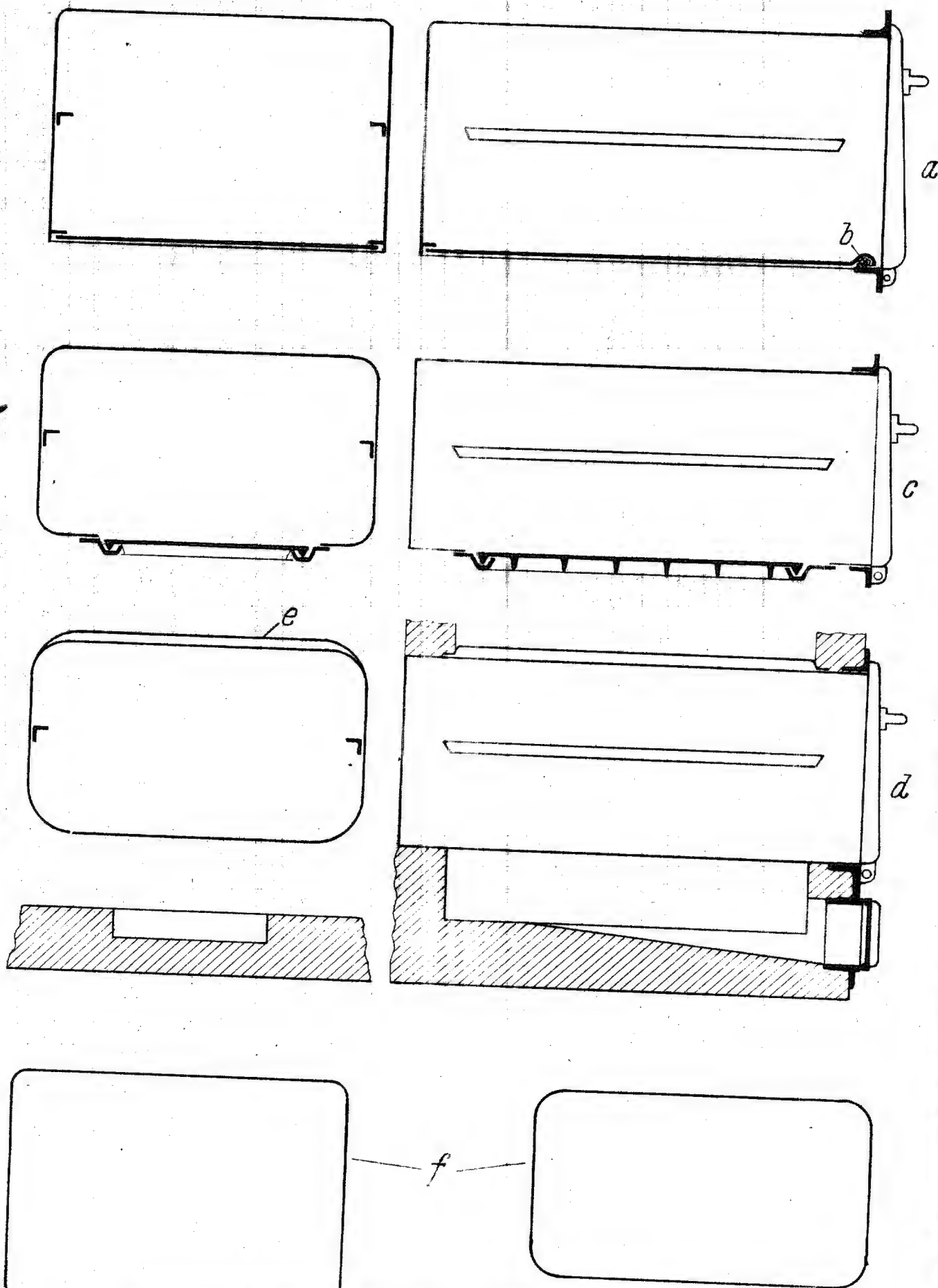
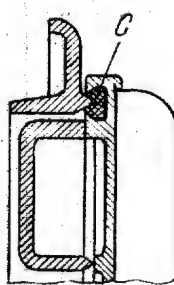
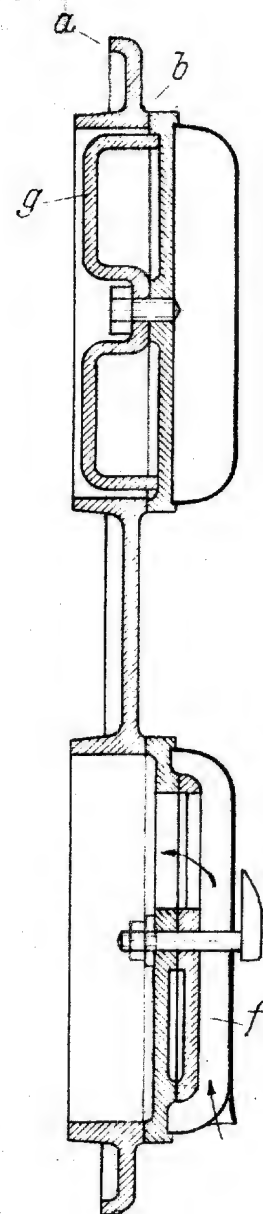
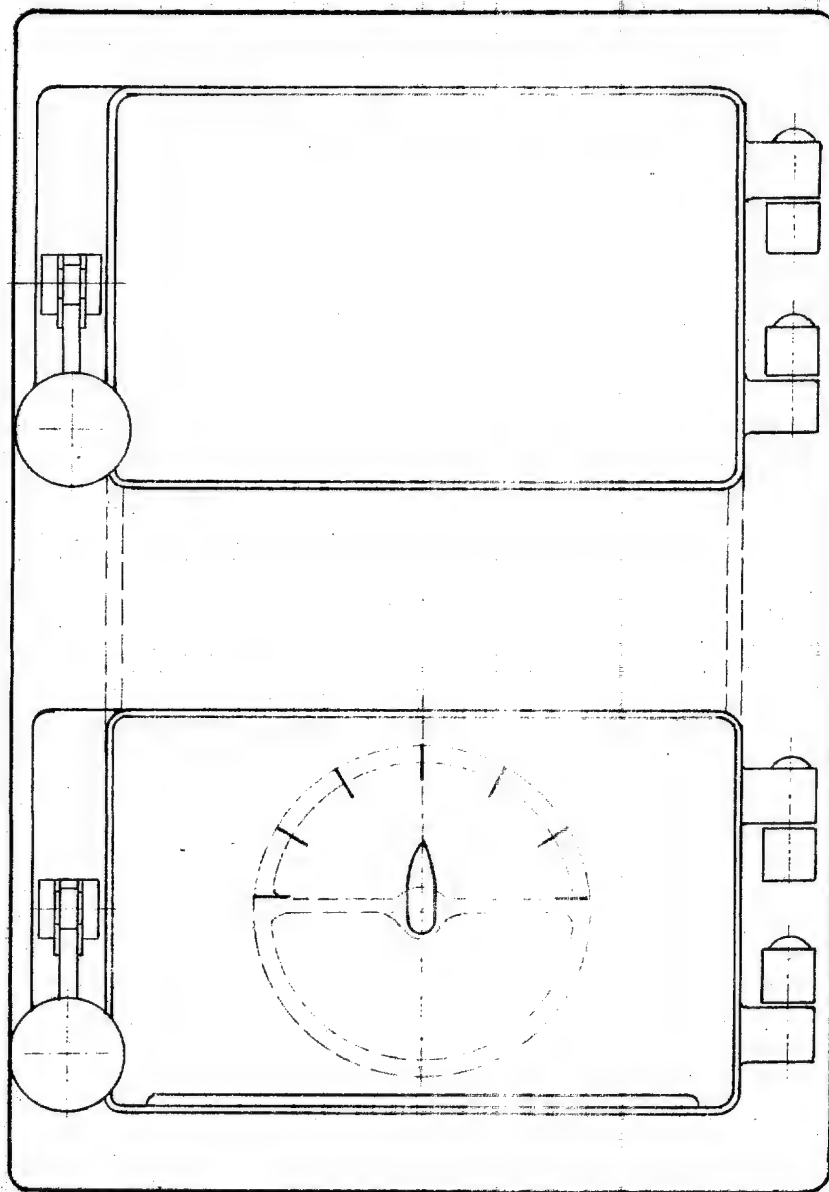


Abb.6 Рис.6





211.8

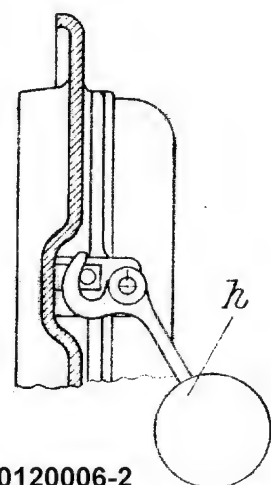
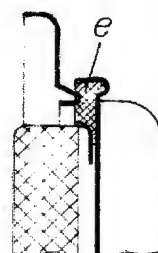
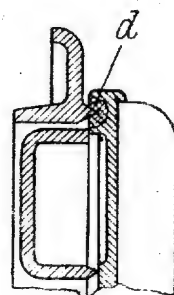


Abb.8 Рис.8

Рис. 9  
211.9

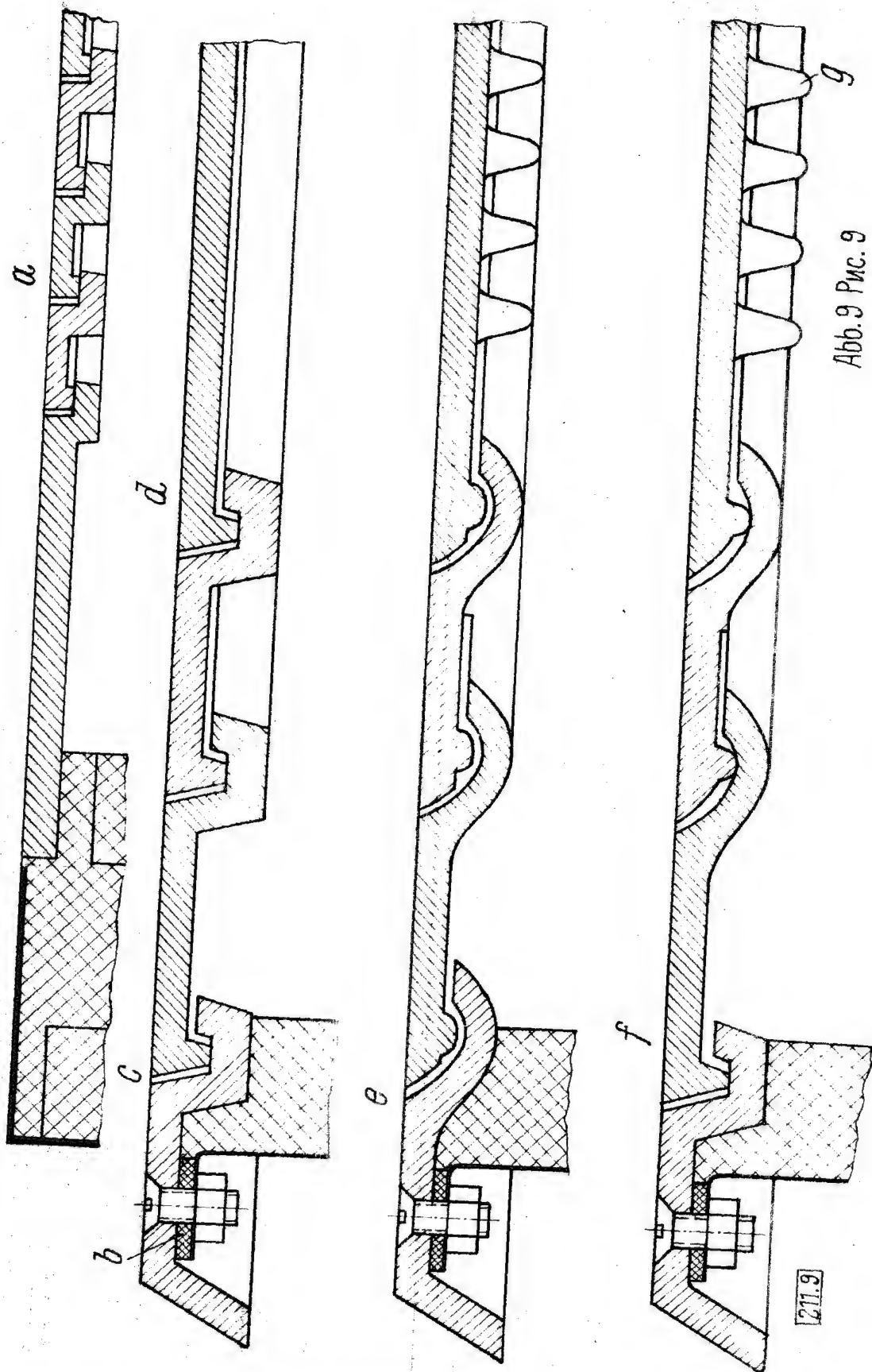
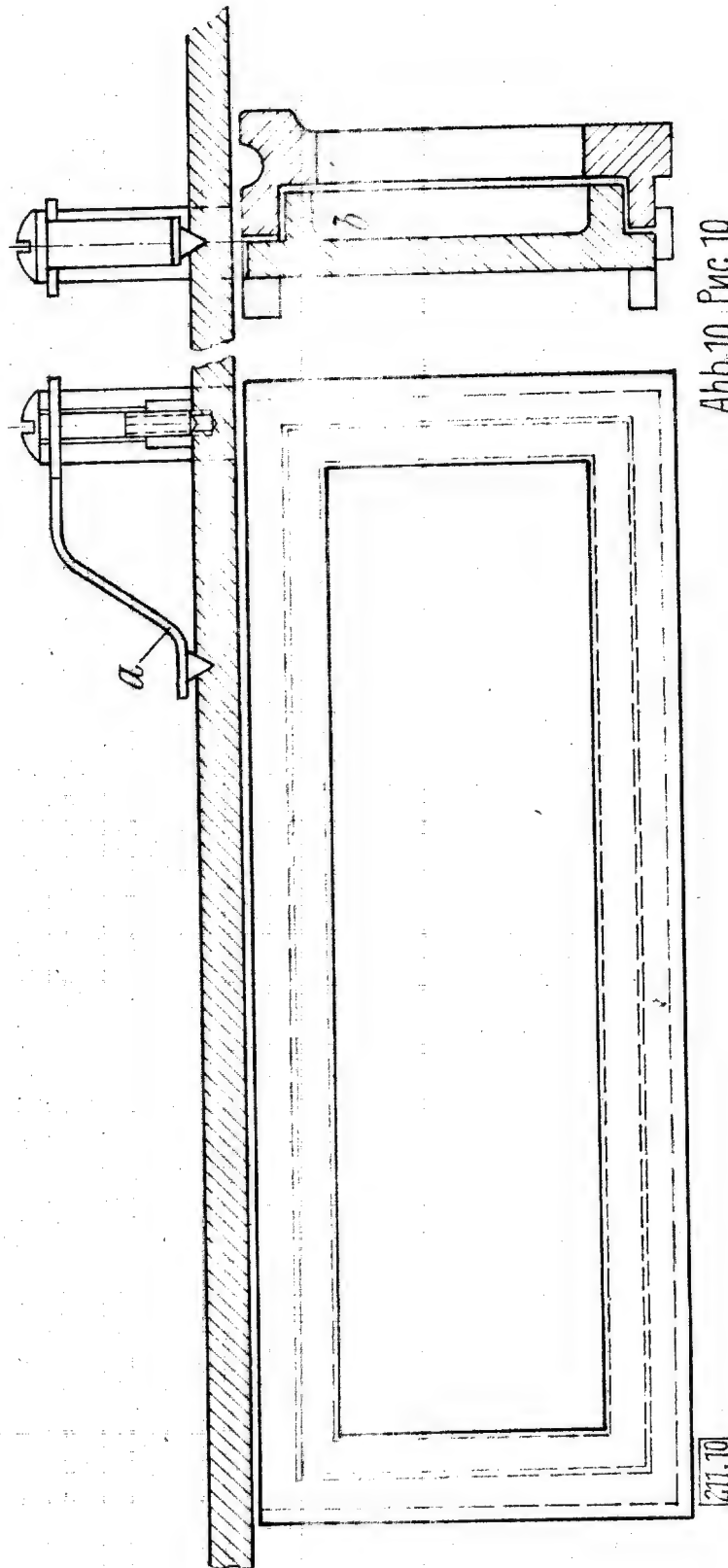


Abb. 9 Рис. 9





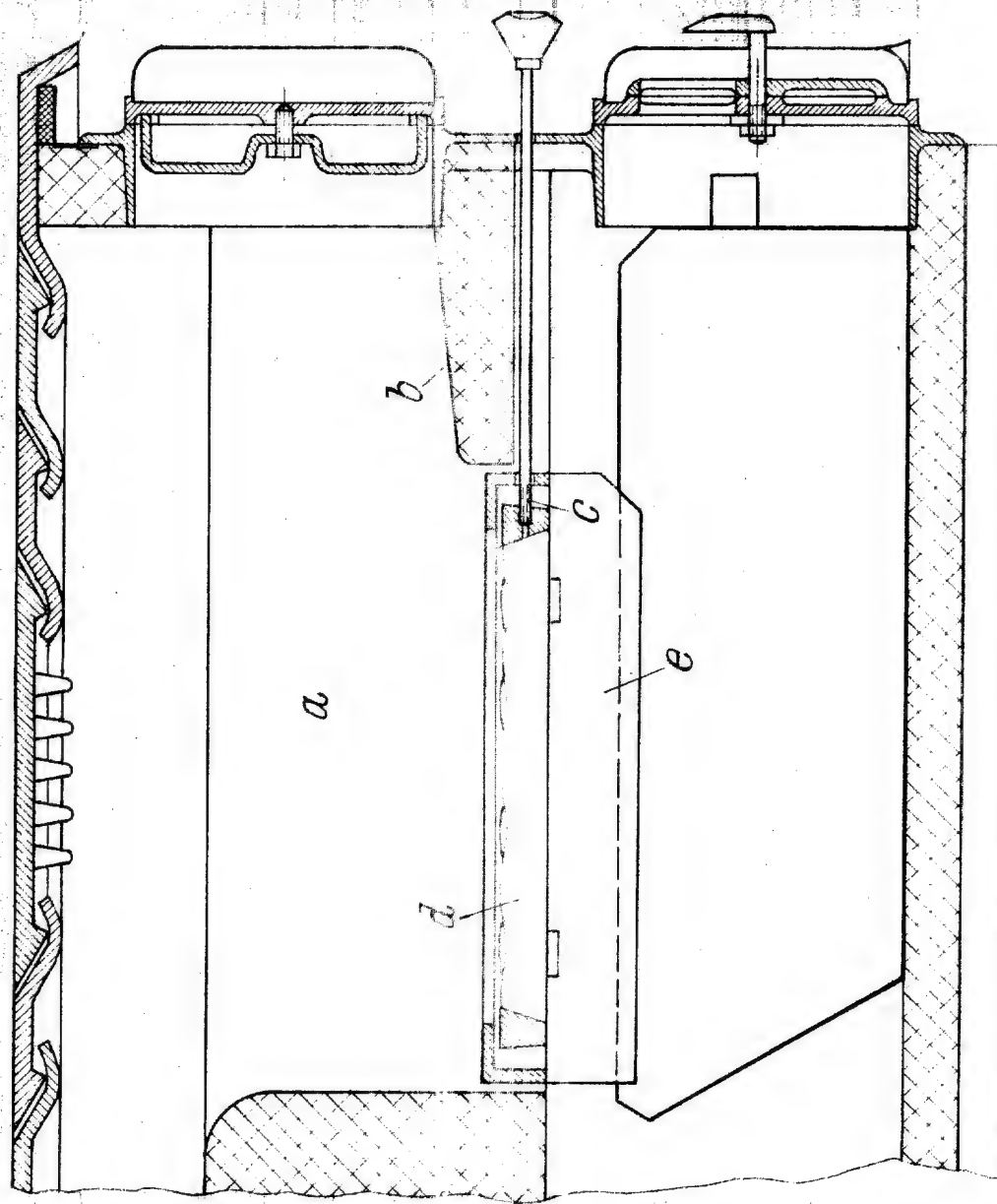
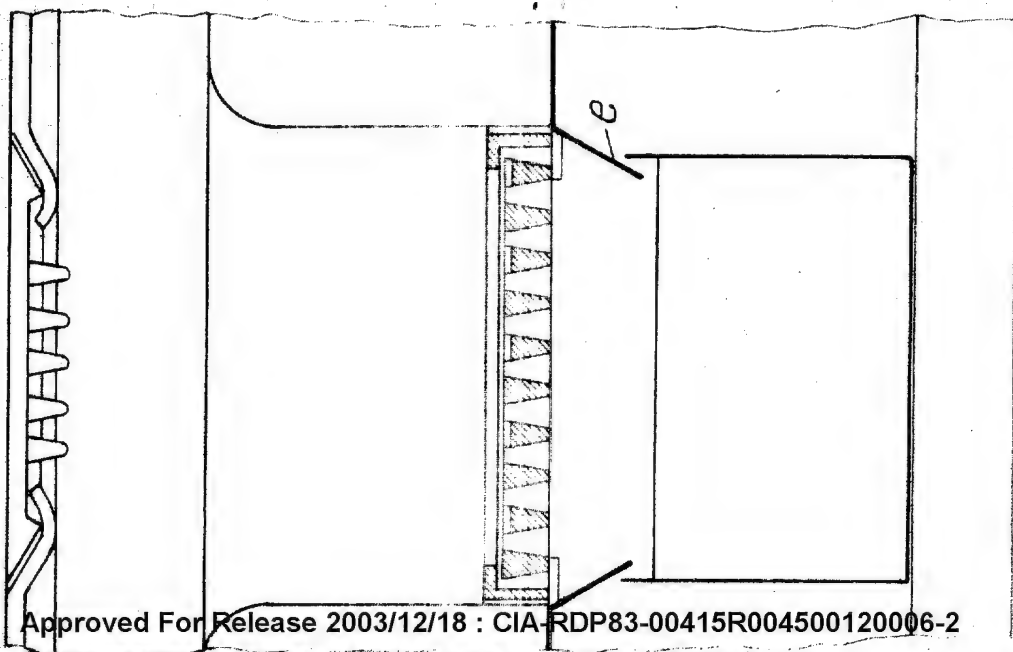


Abb.11 Рис.11



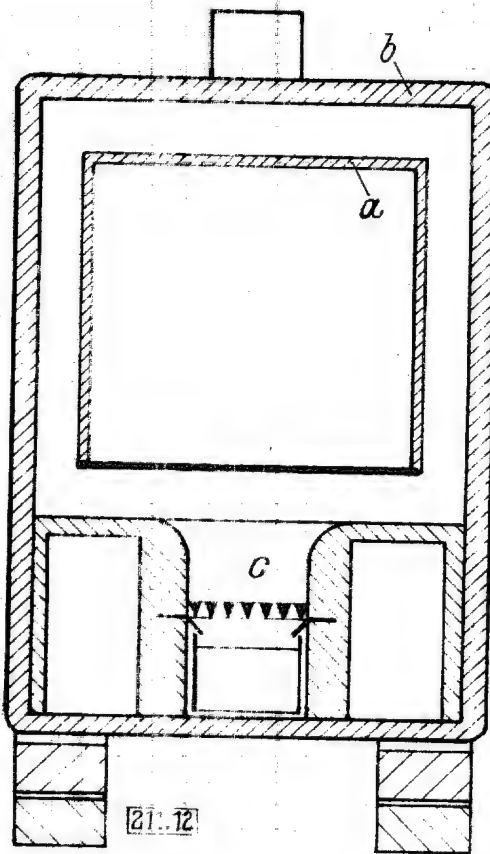
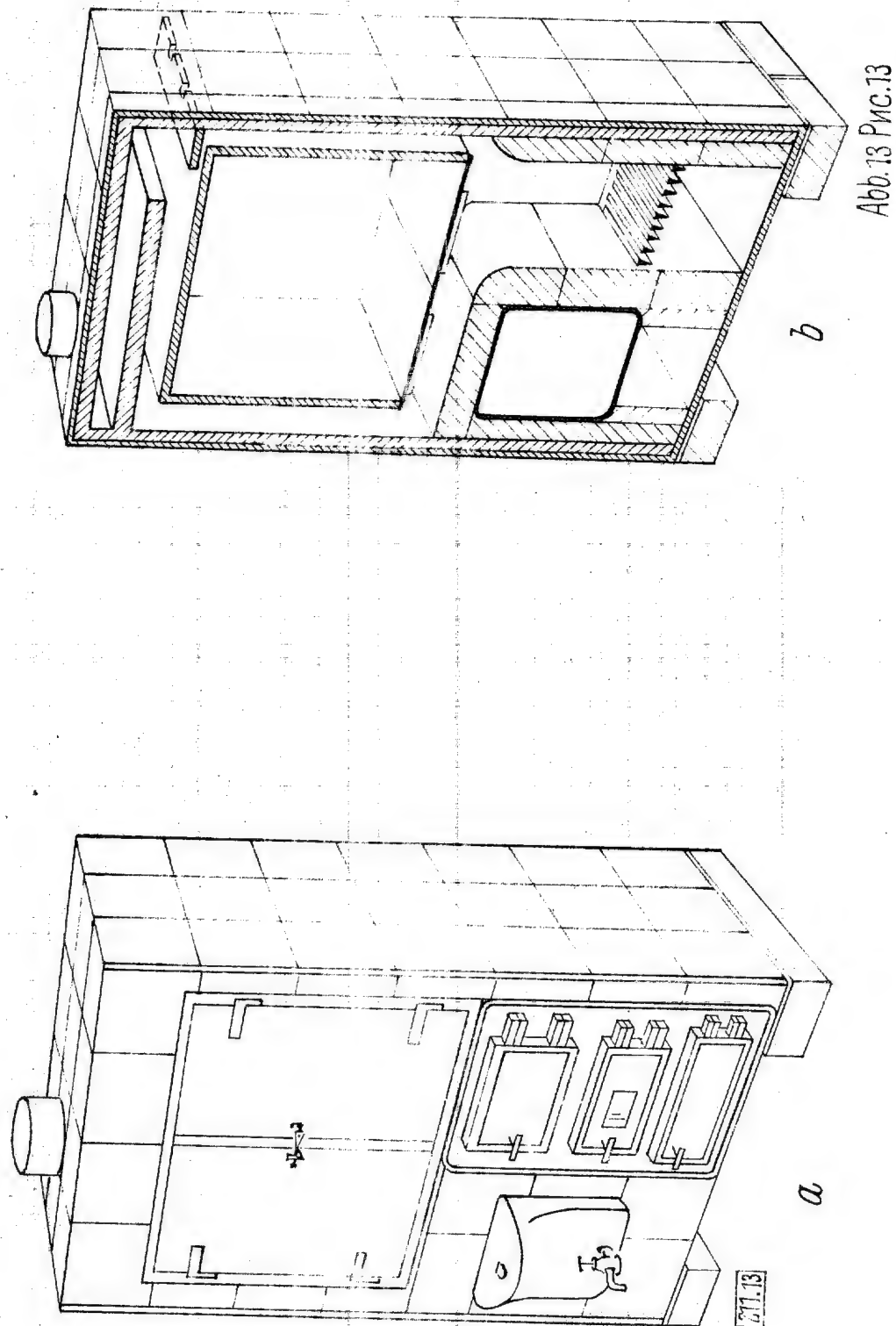


Abb.12 Рис.12



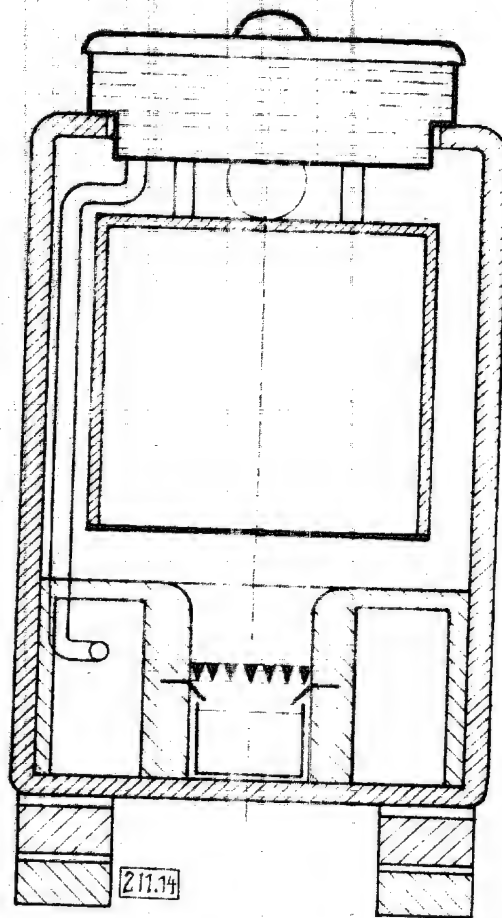
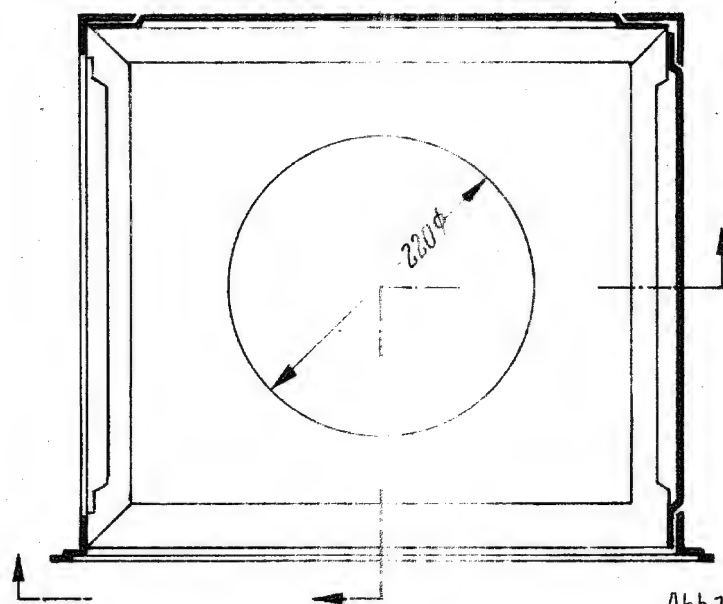
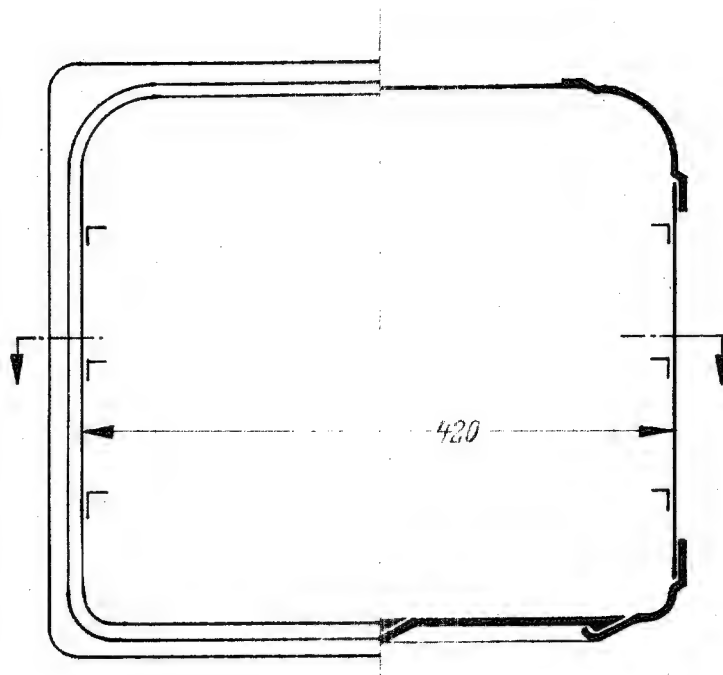


Abb.14 Рис.14



211.15

Abb.15 Рис.15

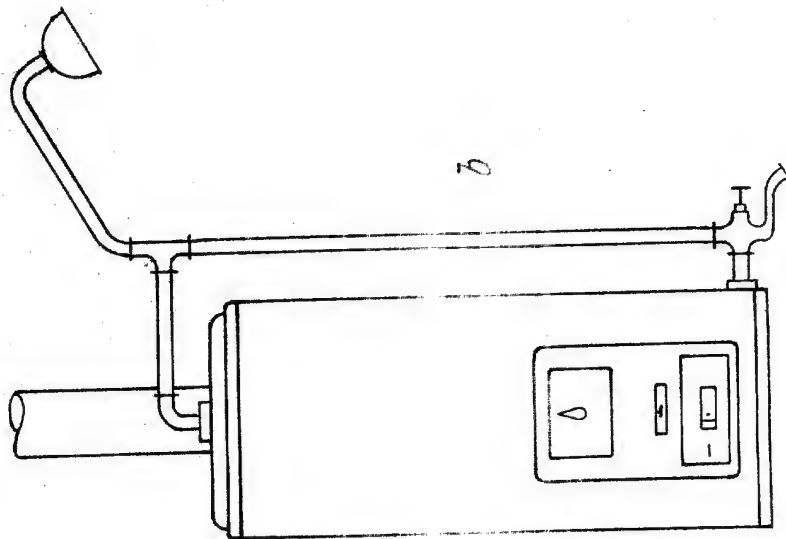
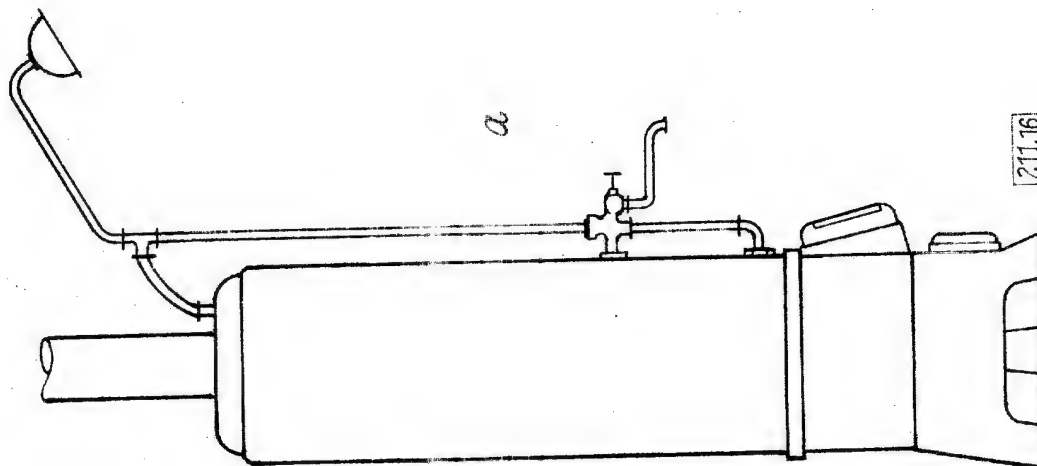


Abb. 16 Рис. 16



211.16





Abb.17 Рис.17

W. L. L. 211

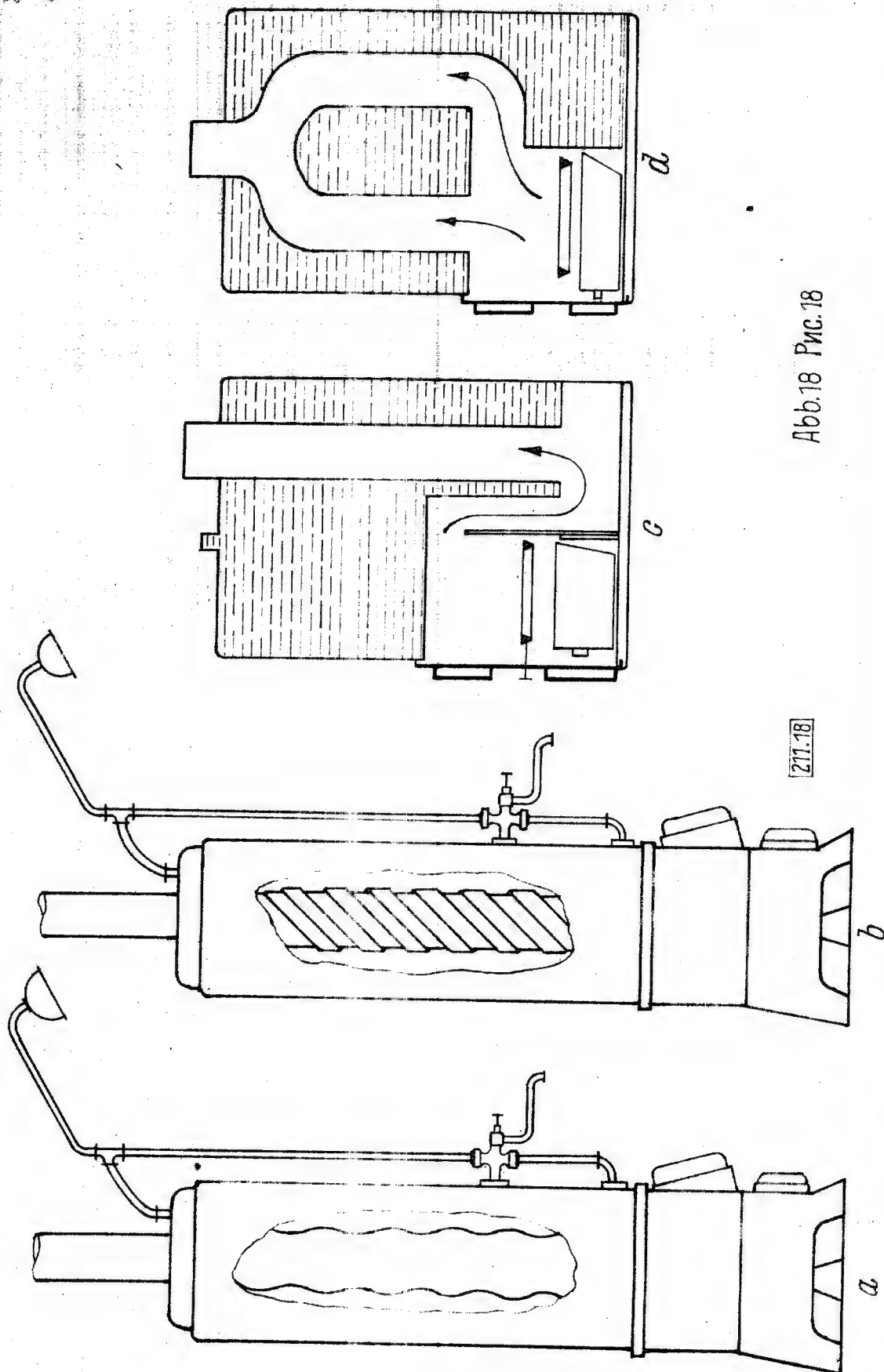
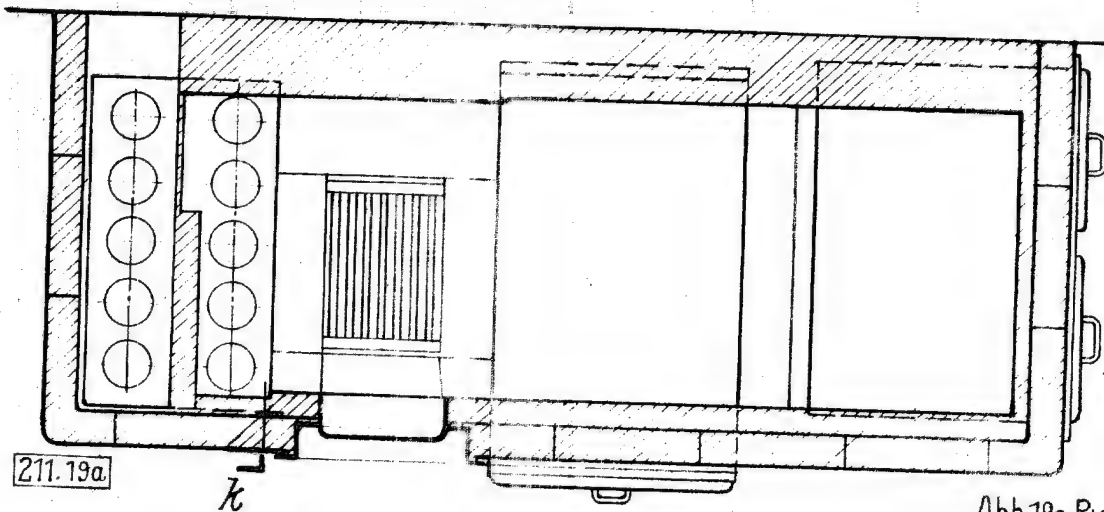
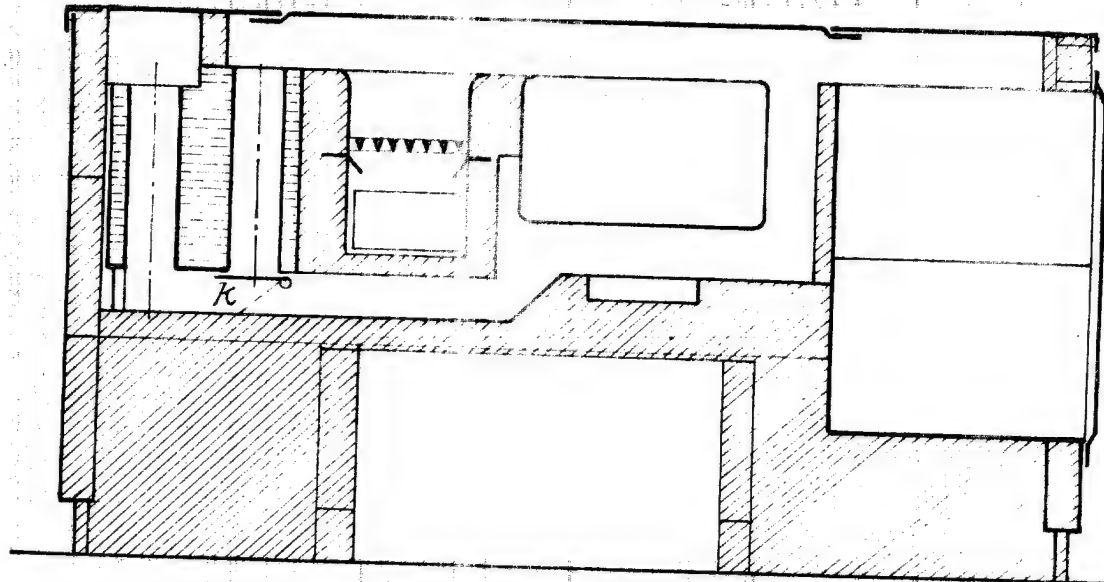
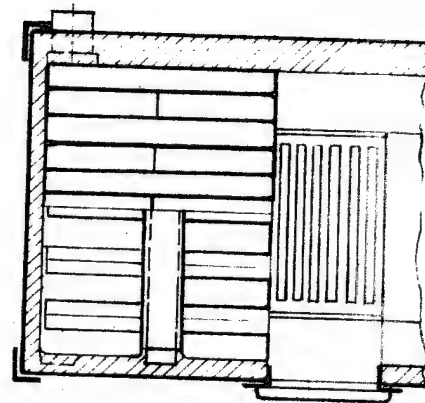
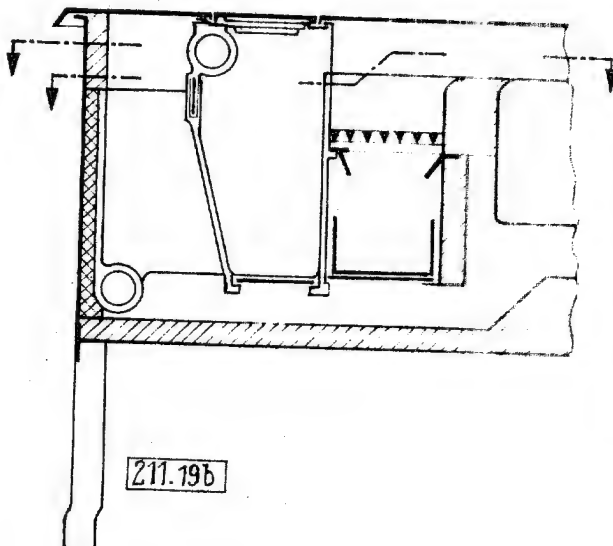


Abb.18 Рис.18



211.19a

Abb.19a Рис.19а



211.19b

Abb. 19b Рис.19б

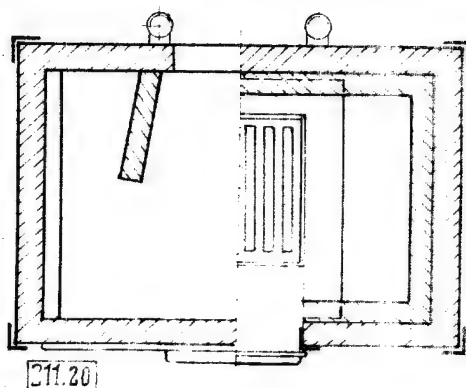
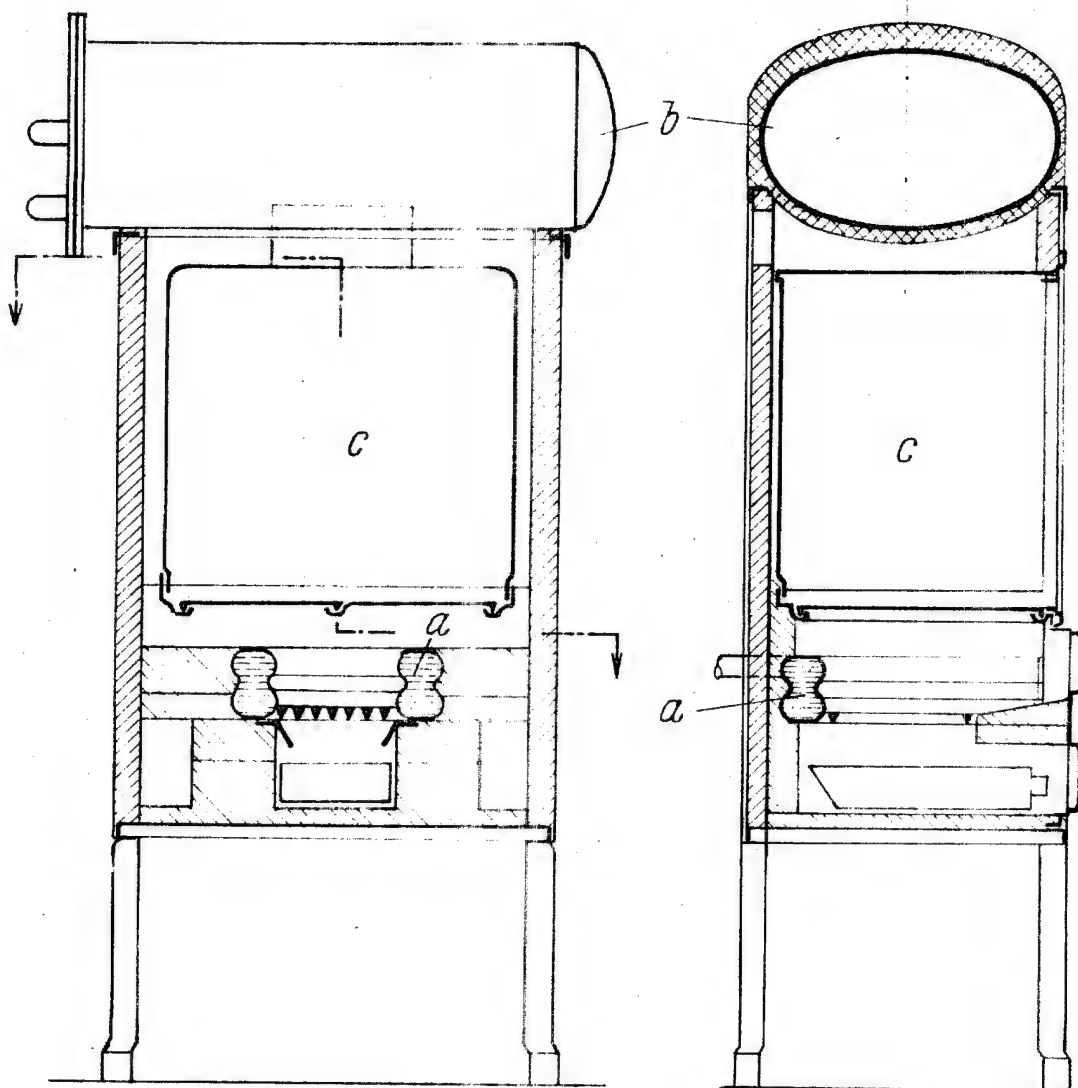
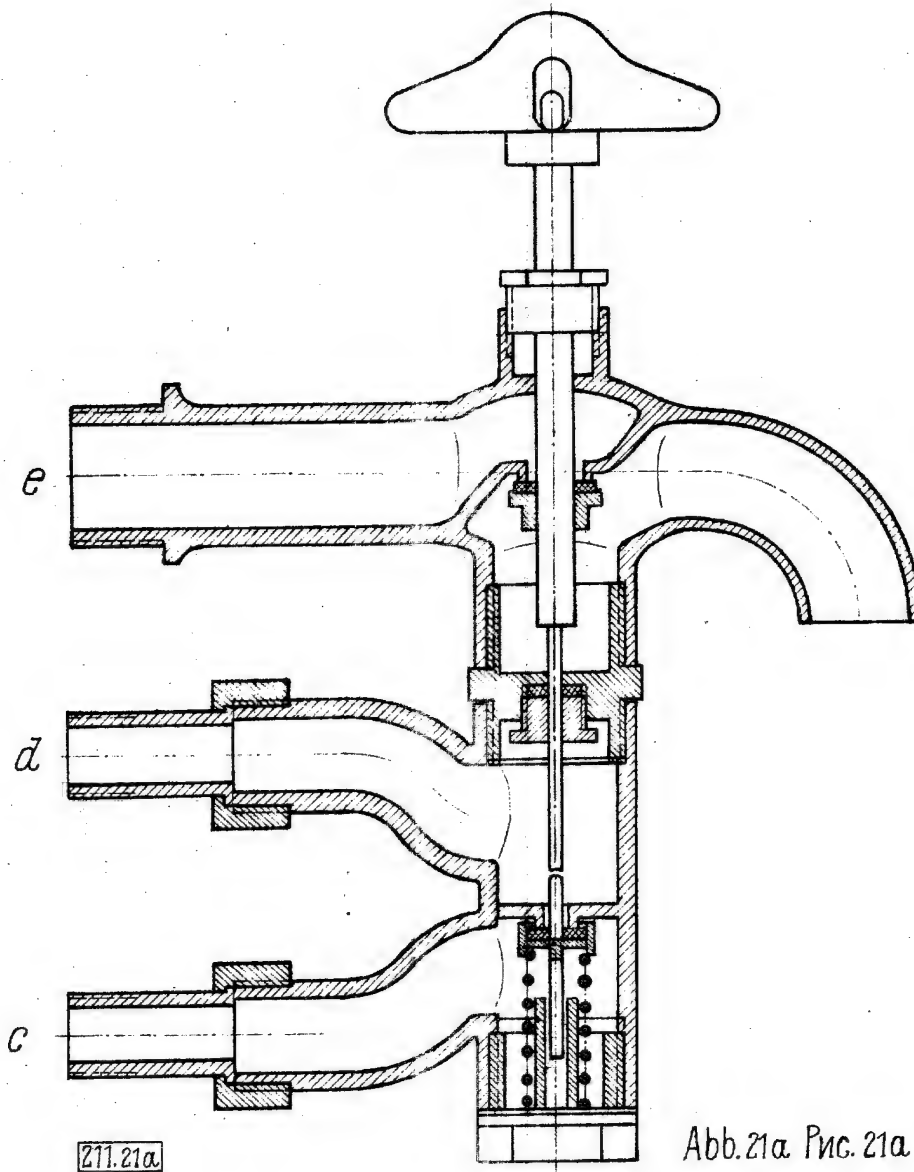


Abb. 20 Рис. 20

Wein 211



Winnam 211

11.11.18

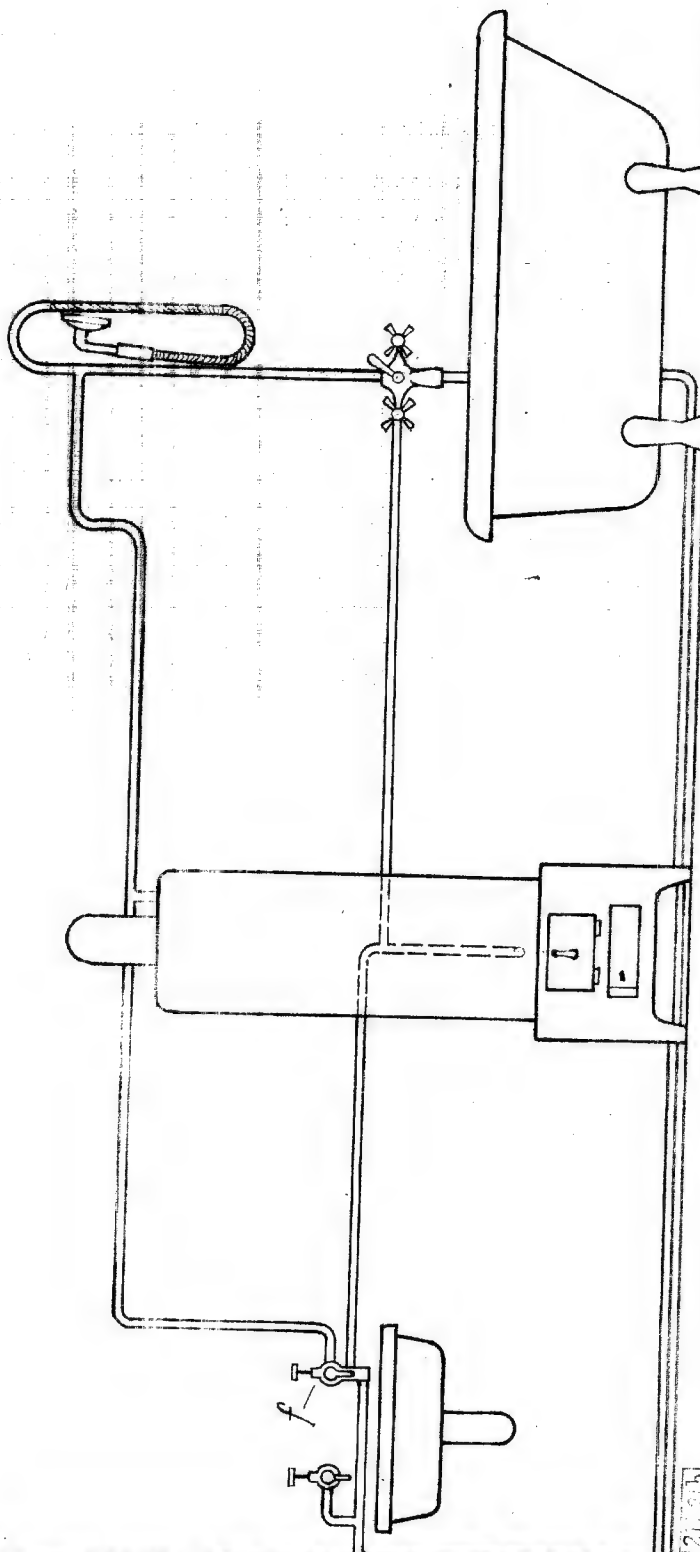
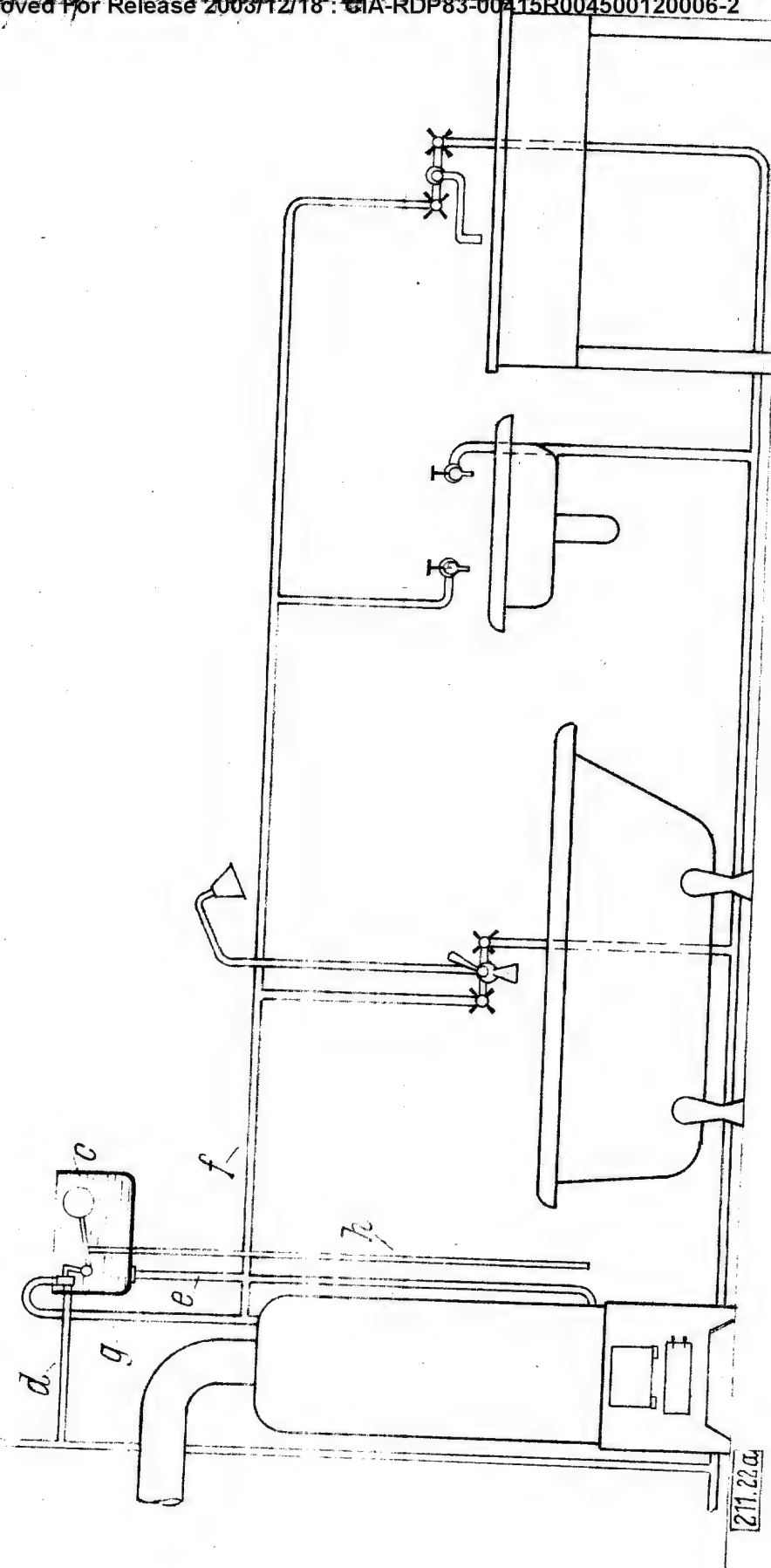
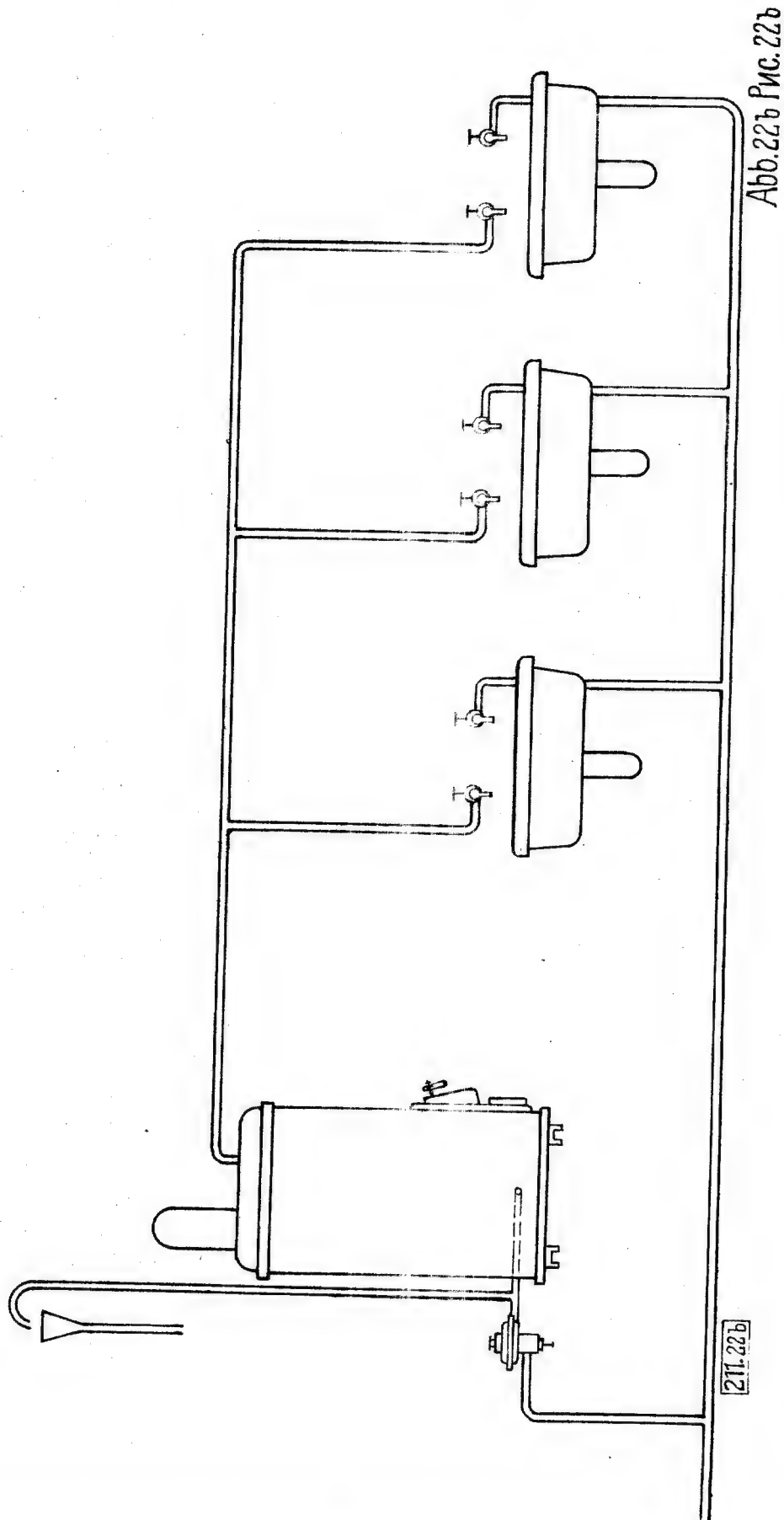


Abb. 21b Рис. 21b

21b







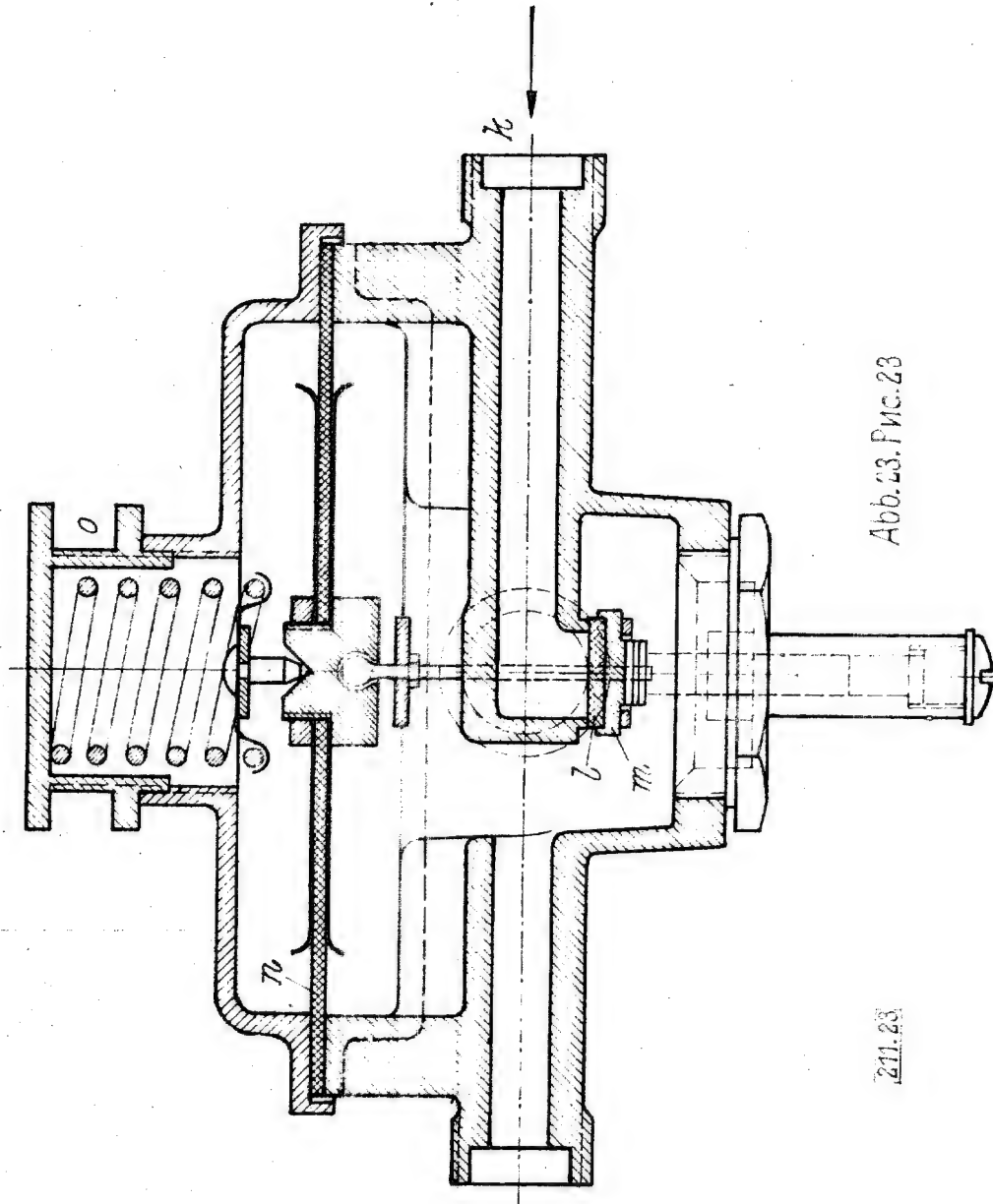


Abb. 23. Рис. 23

Abb. 24 PNC.24

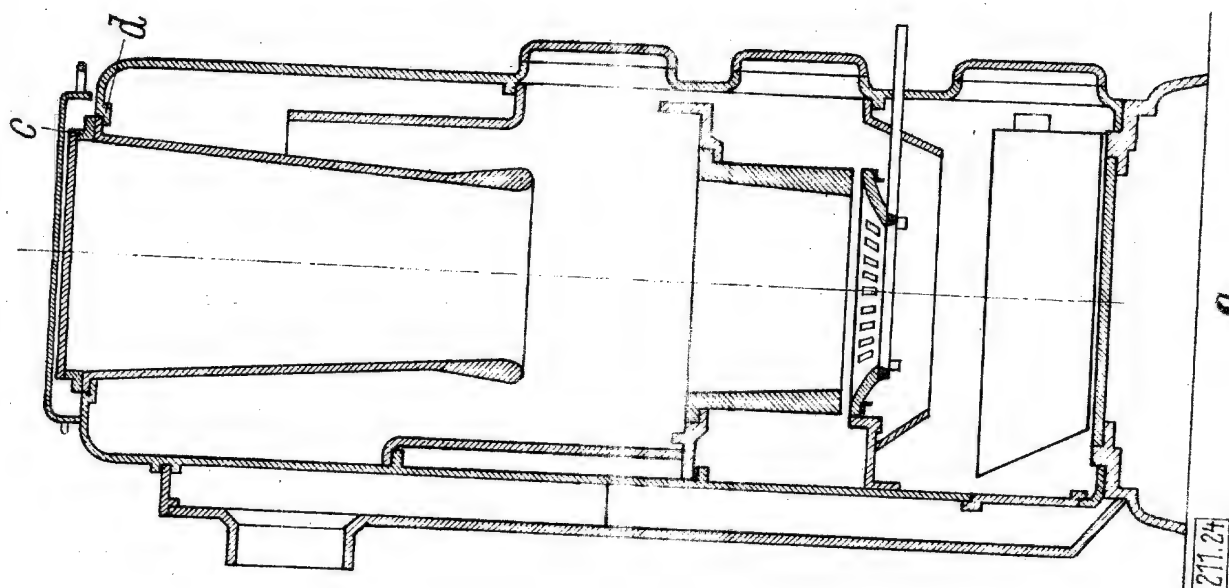
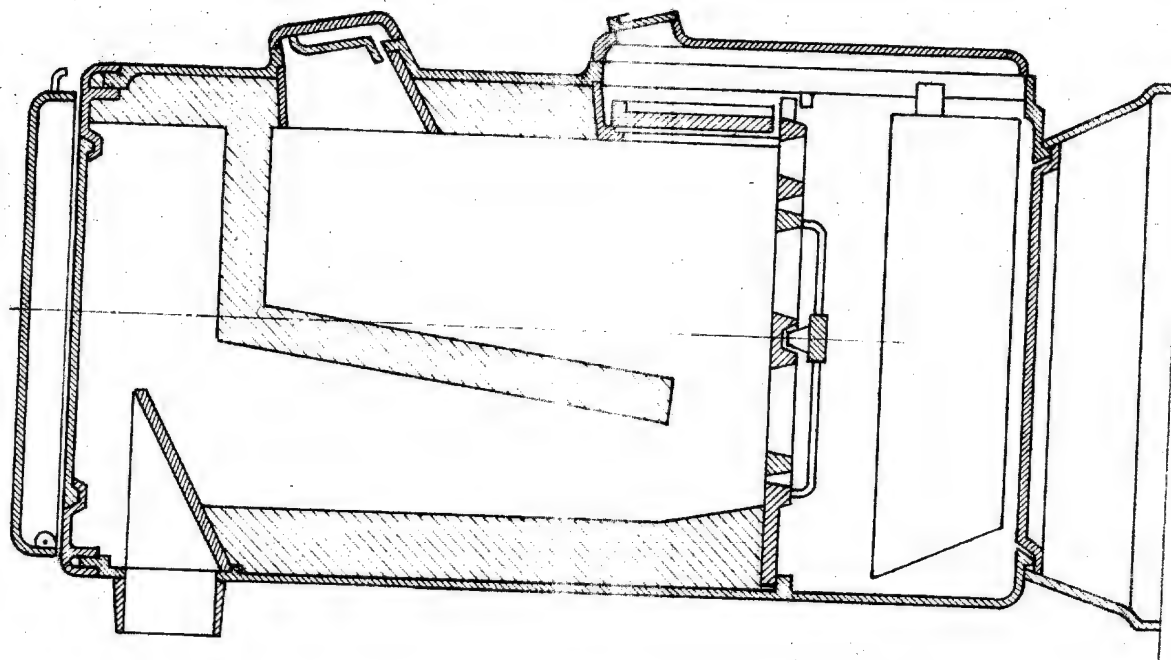
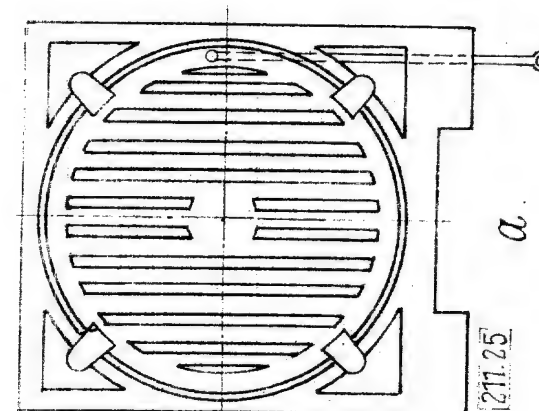
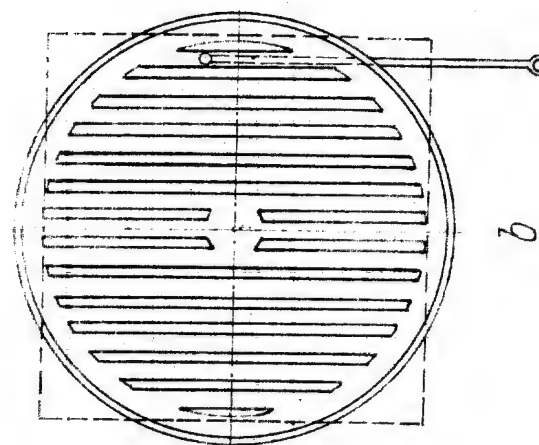
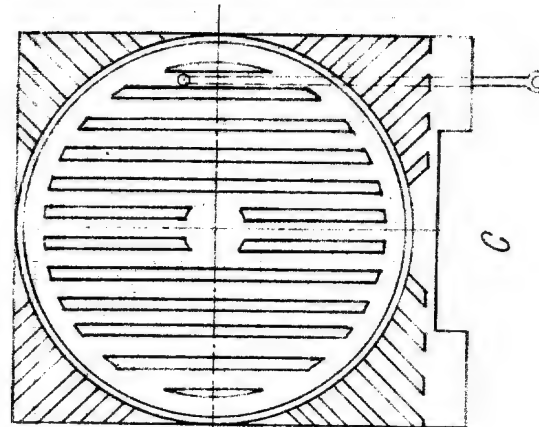
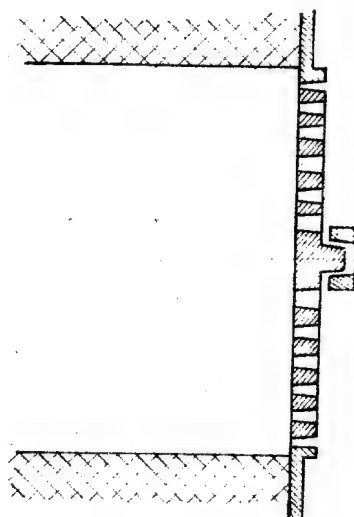
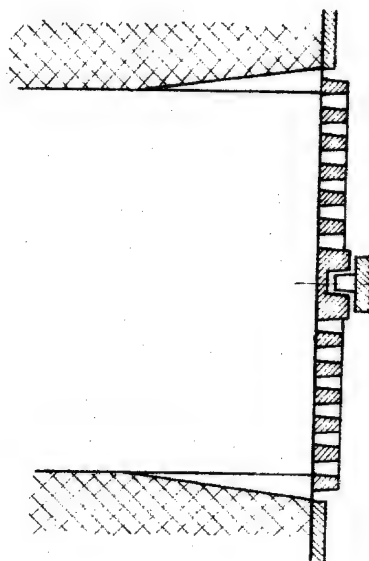
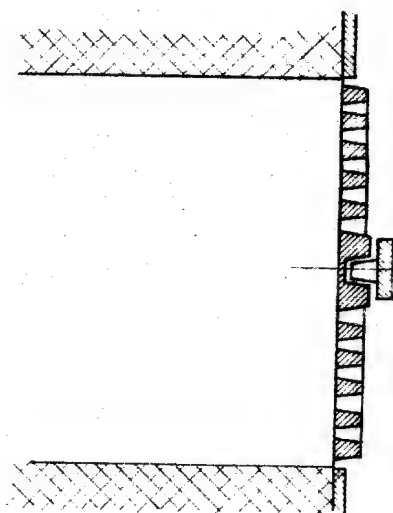


Abb.25 Рис.25



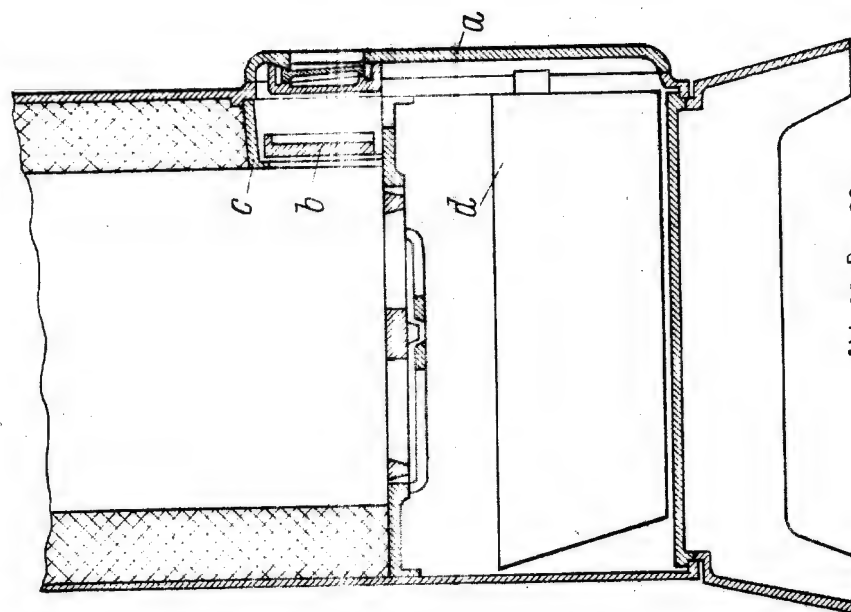
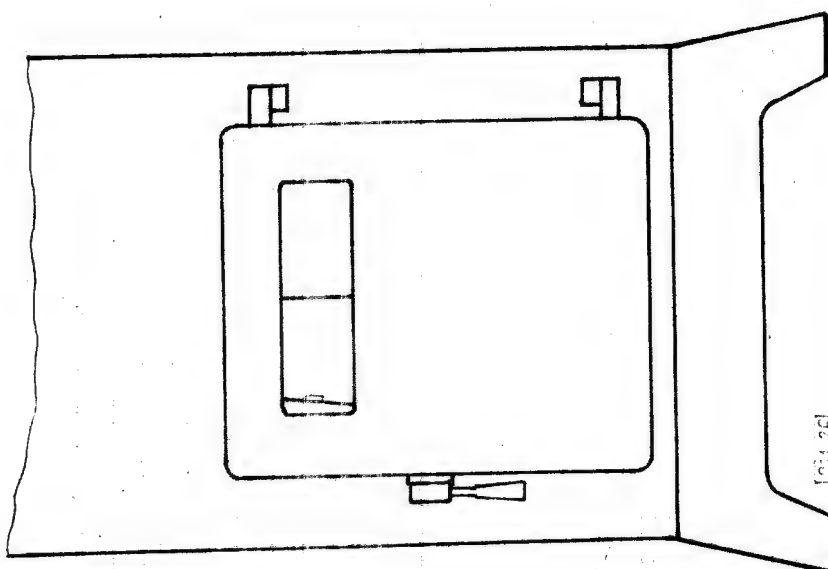


Abb. 26. Рис. 26



[21.26]



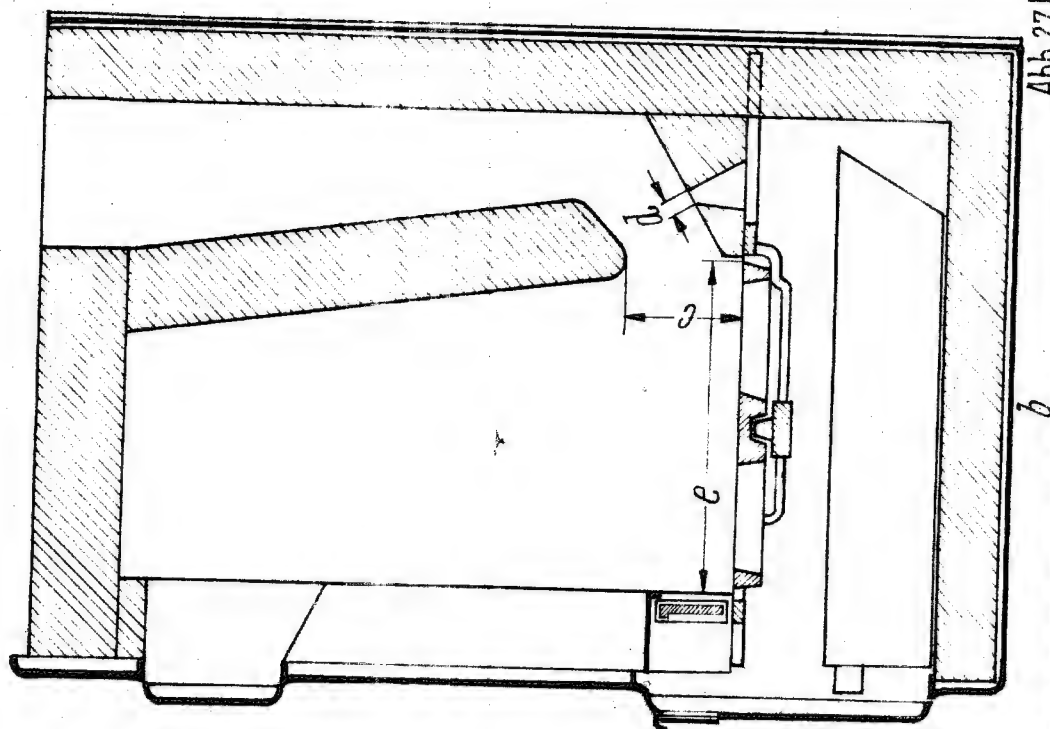
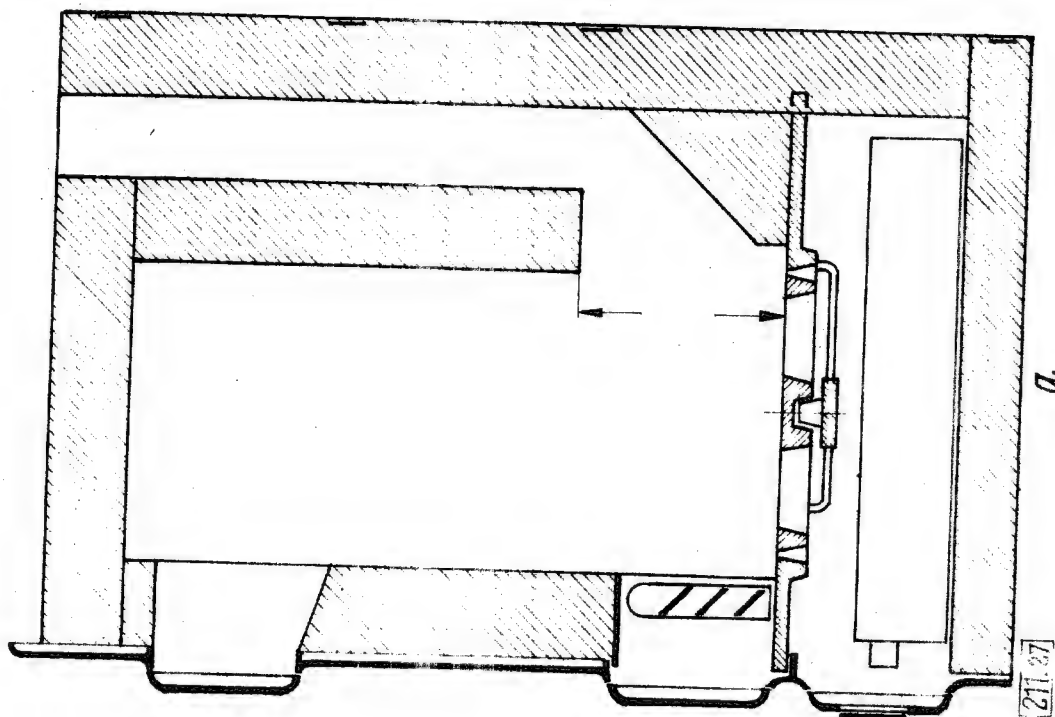


Abb. 27 Рис. 27

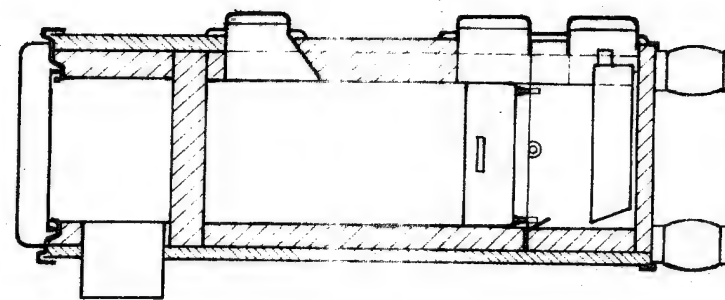
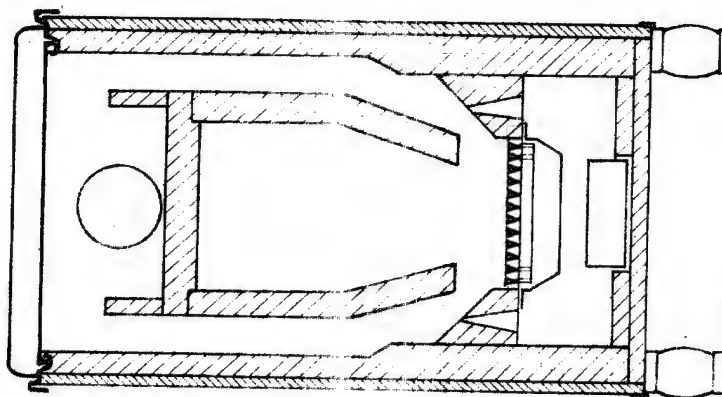


Abb. 28. Рис. 28



21.28

- 2 -

**Stellungnahme zu dem Bericht**

**Nr. 310 IB/26 von Dr. J. Ratzke: Messung von Klopfeschwingungen**  
-----

Der Bericht gibt einen klaren Überblick über die heute zur Verfügung stehenden Klopfmeßgeräte, wobei auch besonders auf die Verfahren zur Klopfuntersuchung an Mehrzylinder-Motoren eingegangen ist.

Diesen Verfahren kommt im Hinblick auf die unterschiedliche Bewertung der Kraftstoffe im Einzylinderprüfmotor und im Mehrzylindermotor erhöhte Bedeutung zu. Erlauben sie doch das Verhalten der verschiedenen Motorarten den Kraftstoffen gegenüber auf dem Prüfstand und, was wichtig ist, auch im praktischen Betrieb auf der Straße zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse tragen bei der Weiterentwicklung zur Angleichung von Motor und Kraftstoff bei.

gez. Dr. Schmidt

- 7 -

### Inhaltsangabe

In der Arbeit werden zuerst die verschiedenen, auch zum Aufzeichnen von Klopferscheinungen geeigneten Arten von Indikatoren zur stetigen Aufnahme des  $p$ - $v$ -Diagramms aufgeführt und hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeit und Arbeitsweise beurteilt. Nach Berücksichtigung des ersten Klopfanzeigemeßgerätes, des Springstat-Indikators, werden die in der Hauptsache verwendeten Klopfanzeigegeräte, das sind der Piezoquarz-Druckindikator und die induktiven Aufnahmegeräte, auf die Brauchbarkeit für Klopferschwingungsmessungen untersucht.

Die Verfahren zum Messen der ersten und zweiten Ableitung des Druckes werden angeführt, und die Klopfmeßverfahren, bei welchen sich beim Übergang von der normalen zur klopfenden Verbrennung im Verdichtungsdiagramm ein deutlicher Knick ausprägt, als die aussichtsreichsten Klopfanzeige-Meßgeräte genauer berücksichtigt. Es werden die Verfahren zum Aufzeichnen des  $d^2p/dt^2$ -Diagramms und die Zylindertemperatur-Messungen mittels Meßstopfens näher skizziert.

Zum Schluß angeführt werden Klopfmeßverfahren für Motoruntersuchungen im Betriebszustand, z.B. beim Kraftfahrzeugmotor während der Fahrt, bei welchen an Serienmotoren keinerlei Änderungen vorgenommen werden müssen. Bei diesen Verfahren können nicht die beim Klopfen auftretenden Gasschwingungen selbst, sondern nur die dadurch angeregten Schwingungen von Motorenbauteilen als Schwingungsgröße, insbesondere als Beschleunigungsstoß, erfasst werden. Das für diese Zwecke entwickelte akustische Meßverfahren und induktive oder trägerfrequenz-modulierte Aufnahmeverfahren werden beschrieben.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Inhaltsangabe . . . . .	3
Inhaltsverzeichnis . . . . .	4
Indikatoren . . . . .	5
Allgemeine Gesichtspunkte . . . . .	5
Piezo-elektrische Meßgeräte . . . . .	6
Induktive Meßgeräte . . . . .	9
Kapazitive Meßgeräte . . . . .	12
Klopffmeßverfahren und Anzeigegeräte . . . . .	14
Allgemeine Erkenntnisse über den Klopfvorgang . . . . .	14
Druckanstieg anzeigende Meßverfahren und Geräte . . . . .	15
Meßverfahren, welche einen Knick im Ladedruck- und Verdichtungs-Diagramm aufweisen . . . . .	19
Klopffmeßverfahren für Motoruntersuchungen ohne Induziereinrichtung . . . . .	22
Induktives Schwingungsaufnahmegerät . . . . .	23
Akustisches Aufnahmeverfahren . . . . .	25
Kapazitives und induktives Trägerfrequenz- Aufnahmegerät . . . . .	27
Zusammenfassung . . . . .	28
Literaturverzeichnis . . . . .	29



- 5 -

IndikatorenAllgemeine Gesichtspunkte

Für die Weiterentwicklung der Verbrennungskraftmaschine ist die genaue Erforschung sowie die Kenntnis des Druckverlaufes im Zylinder, in den Ansaug-, Auspuff- und Kraftstoffleitungen notwendig. Für die Untersuchung der motorischen Eigenschaften neuer Kraftstoffe werden Klopfmessungen am Einzylinder-Prüfmotor oder an Mehrzylinder-Motoren im Betriebszustand selbst durchgeführt. Für beide Messungen sind die meßtechnischen Hilfsmittel im wesentlichen die gleichen, so daß hier zuerst die Geräte zur Aufnahme des Druckes angeführt werden sollen. Die Schwierigkeiten bei der Messung des Zylinderdruckes bei den schnellaufenden Motoren liegen hauptsächlich darin, daß das Meßgerät nicht trägheitslos ist und infolgedessen mit einer gewissen Verzögerung anzeigt.

Da in dieser Arbeit Klopfmessungen behandelt werden sollen, werden die Druckmeßgeräte zur Aufnahme von mittleren Druck-Zeit-Diagrammen, bei denen aus den einzelnen Arbeitspielen jeweils verschiedene Punkte herausgegriffen und aufgezeichnet werden, nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Es sind dies der Punktindikator nach K. J. de Juhasz <sup>1 x)</sup>, der Fernborough-Indikator <sup>2</sup>, der MIT-Indikator <sup>3</sup> und der Glühlampen-Indikator der DVL <sup>4</sup>. Mit diesen Geräten und den damit aufgezeichneten Mittelwert-Diagrammen von verschiedenen Arbeitstakten werden vor allem Untersuchungen über indizierte Mittelwertsdrücke und die Ermittlung des Exponenten der thermodynamischen Kenngröße unter den verschiedensten Betriebsbedingungen durchgeführt. Für die Erforschung des Verbrennungsvorganges, der Klopfgrenze und zur Untersuchung der Gleichmäßigkeit der einzelnen Arbeitspielen müssen Indikatoren verwendet werden, welche die Diagramme der einzelnen Arbeitstakte gesondert aufzeichnen.

---

x) Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttumsverzeichnis am Schluß des Berichtes.



- 6 -

Von den in der Messtechnik allgemein verwendeten Verfahren, das sind das piezo-elektrische, induktive, kapazitive, magneto-elastische und das Halbleiter-Verfahren, sind alle zum Bau von Indikatoren und zur Aufzeichnung des wechselnden Gasdruckes im Brennraum verwendet worden. Das magneto-elastische und das Halbleiterverfahren sind aber nach einigen Anfangsversuchen infolge der großen Temperaturabhängigkeit einerseits und der Stoßempfindlichkeit andererseits nicht weiterentwickelt worden. Abb. 1 zeigt die Kohle-Druckmeßkammer nach Glamann und Triebnigg 5. Die Wirkungsweise ist aus der Zeichnung zu ersehen. Die Eigenfrequenz ist aber infolge des dabei verwendeten Zwischengliedes sehr niedrig, so daß nur langsam verlaufende Vorgänge mit diesem Gerät untersucht werden können.

Abb. 1

#### Piezo-elektrische Meßgeräte

Insbesondere das piezo-elektrische Verfahren wurde von den verschiedenen Forschungsstellen zum Bau von Indikatoren herangezogen. Es hat einen sehr hohen Stand der Entwicklung erreicht, da hier am leichtesten die Möglichkeit besteht, eine hohe Eigenfrequenz des Gerätes zu erzielen 6, 7, 8, 9. Zu diesem Zweck ist die Quarzmeßkammer bei den neueren Bauarten in einer Hülse, welche am besten gleich die Membrane trägt, vorgespannt eingebaut. In der Regel besteht die Quarzmeßkammer aus zwei Quarzscheiben, von denen eine zwecks Durchführung der mittleren Ableitungselektrode durchbohrt ist. Je nach dem Verwendungszweck, d.h. nach der am Gerät auftretenden Temperatur, ist das Gehäuse für Kühlung (Wasser, Luft) eingerichtet.

Bei den mittels Hülse vorgespannten Indikatoren werden, wie Meurer 10 zeigt, etwa 75 % der äußeren Kräfte auf den Meßquarz übertragen, was bei dem mittels Membrane vorgespannten Indikatoren bei weitem nicht der Fall ist. Abb. 2 zeigt eine Ausführung kleinster Bauart mit hoher Eigenfrequenz. Bei

Abb. 2

- 7 -

Abb. 3

sonders ist darauf zu achten, daß die untere Abstützplatte des Meßquarzes spannungslos auf der Membran aufsitzt. Bei der in Abb. 3 dargestellten Konstruktion ist ebenfalls eine dünne Abdichtmembran vorhanden, welche nur an den Federungsstellen den Verbrennungsgasen direkt ausgesetzt ist, während der übrige Teil durch eine Abdeckplatte geschützt wird. Da sich bei genauen Messungen herausgestellt hat, daß für je etwa  $100^{\circ}$  Temperaturzunahme der Elastizitätsmodul des Meßquarzes um etwa 1,8 % abnimmt, ist Wasserkühlung vorgesehen. Bei den Messungen im Zylinderkopf schnelllaufender Motoren beträgt die im Meßquarz erzeugte mittlere Energie etwa  $10^{-9}$  Watt. Daher muß eine Verstärkung vorgesehen werden. Da aber jede zum Meßquarz parallel liegende Kapazität die dem Meßdruck entsprechende Ladung  $Q$  und somit die Spannungsänderung  $V$  schwächt ( $V = \frac{Q}{C}$ ), ist außer einer hohen Isolation auf geringe Kapazität der Meßleitung größter Wert zu legen.

Abb. 4

Außerdem ist es zweckmäßig, das Elektrometerrohr, das ist das hoch isolierte Eingangsrohr des Verstärkers, in der Nähe der Meßstelle unterzubringen (ähnlich wie beim Kondensator-Mikrophon). Außerdem müssen die Zuführungskabel gut abgeschirmt werden. Abb. 4 gibt die Prinzip-Schaltung eines Verstärkers wieder. Der Übersichtlichkeit wegen ist die Schaltung so gezeichnet, als ob alle Spannungen von Batterien entnommen würden. Bei neuzeitlichen Geräten werden sie (siehe Abb. 24, 25) selbstverständlich aus den Starkstrom-Netzspannern entnommen. Die Empfindlichkeit wird in der Regel mit Hilfe von Kapazitäten eingestellt, die parallel zum Meßquarz liegen. Der Ausgang ist zum Anschluß sowohl für ein Kathodenstrahlrohr als auch für einen Schleifen-Oszillographen vorgesehen. Da beim Schleifen-Oszillographen bei Verwendung der gebräuchlichen Meßschleifen von Siemens & Halske infolge der Dämpfung Nachheilwinkel auftreten, welche zu Verzerrungen des Diagrammes führen, sollen hier die Untersuchungen von L. Bisang <sup>11</sup> angeführt werden. Abb. 5 zeigt die Nachheilwinkel der verschiedenen

Abb. 5

- 8 -

Schleifenarten in Abhängigkeit von der Frequenz. Daraus ist zu ersehen, daß bis zu einem Verhältnis der aufgezeichneten Frequenz zur Eigenfrequenz von etwa 0,3 die Verzögerung konstant ist, d.h. die Nachstellung in Grad Kurbelwinkel nimmt mit der Drehzahl proportional zu. Für eine Schleife Type V von Siemens & Halske, welche die geringste Verstärkung benötigt, ist bei 3000 U/min bereits eine Verzögerung von 6° Kurbelwinkel in der Grundwelle vorhanden. Bei Type I dagegen beträgt sie nur 0,6°. Abb. 6 gibt die Verzerrung bei den einzelnen Schleifentypen gegenüber der Aufzeichnung mit Kathodenstrahl-Oszillographen wieder. Eine Korrektur ist daher im Zeitpunkt der Zündung und bei unstetigem Verlauf des Drucks notwendig.

Abb. 6

Beim Kathodenstrahl-Oszillographen, welcher für die während der Verbrennung auftretenden Schwingungen als trägheitslos anzusehen ist, kann die notwendige Leistungsverstärkung mit wesentlich einfacheren Mitteln erreicht werden. Wird das zweite Plattenpaar von einer mit dem Kolbenweg proportionalen Spannung gesteuert, so kann direkt das pv-Diagramm aufgenommen werden. Bei Verwendung von Mehrschleifen-Oszillographen lassen sich leicht die notwendigen Zuordnungspunkte, das sind Totpunkte, Einspritzdrücke, Nadelbewegung usw. gleichzeitig aufnehmen.

Die Eichung kann bei guter Isolation statisch durchgeführt werden. Eine absolute Aufzeichnung der Null-Linie ist aber nicht möglich; doch sind meistens Entladeschalter für den Maßquarz vorgesehen, damit man jederzeit eine Bezugslinie herstellen kann. Bestimmte Richeusschläge, durch angelegte Spannungen bewirkt, ermöglichen jederzeit die Kontrolle des Verstärkungsfaktors der Anlage. Mit Hilfe der einmal aufgestellten Zuordnung zwischen statischem Druck und Richeusschlag läßt sich dann der Druckmaßstab auch bei etwa auftretender Änderung der Anoden- und Heizspannung festlegen. Der Meßbereich des Indikators selbst kann, wie bereits erwähnt, durch Parallelkapazitäten verschieden eingestellt werden.

### Induktive Meßgeräte

Abb. 7

Von den induktiv arbeitenden Geräten, bei welchen sich eine Meßmembran einer Drosselspule mehr oder weniger nähert und infolge der Änderungen des Luftspalts der induktive Widerstand verändert wird, zeigt Abb. 7 ein Beispiel. Bei dieser Ausführungsform muß die Wärme von der Spule ferngehalten werden. Daher ist ein Übertragungsglied zwischen Indikatorkolben und Hauptmembran vorgesehen. Dadurch ist die Eigenschwingungszahl wieder verhältnismäßig niedrig, so daß nur langsam verlaufende Vorgänge untersucht werden können. Das Gerät wird mit Wechselspannung höherer Frequenz erregt und moduliert betrieben.

Abb. 8, 9

Vom Verfasser selbst wurde ein anderer induktiver Indikator nach Abb. 8 entwickelt. Abb. 9 zeigt die Schnitt-Skizze. Um einen einfachen Aufbau zu ermöglichen, wurde das Gerät in zwei Teilen ausgeführt. Der mechanische Teil besteht aus dem Gehäuse 1, der Membran 2 und dem Tauchanker 3. Der elektrische Teil gliedert sich in die Doppeldrossel 5 mit den Ableitungen 8, dem Spulenkörper 6 und der Spulenhalterung 7, mit der beide Teile fest verschraubt waren. Die Abmessungen werden so gewählt, daß das Gerät in den normalen Zündkerzenbohrungen von 18 und 14 mm Durchmesser untergebracht werden kann.

Für die Membran, welche aus später noch ausgeführten Gründen aus unmagnetischem Material bestehen muß, wurde Chrom-Nickel-Stahl gewählt. Der Tauchanker, welcher sich zwischen den beiden Spulen zentrisch hin und her bewegt, besteht aus Weicheisen und ist mit dem Membranfortsatz hart verlötet. Der Spulenkörper wird am zweckmäßigsten aus Porzellan oder Steatit hergestellt, um die auftretenden Temperaturen je nach Kühlung von etwa 200 bis 250° auszuhalten. Ebenfalls hat sich für diesen Zweck ein Körper aus eloxiertem Aluminium gut bewährt. Durch den seitlich angebrachten Stutzen s und eine gegenüberliegende Bohrung kann Kühlluft zu- und abgeführt werden.



Die elektrische Doppelwessel ist auf dem Spulenkörper in zwei gleichen Hälften auf einem lackisolierten Draht symmetrisch aufgebaut (2 x 3000 Windungen von 005 mm Durchmesser). Damit auch der magnetische Widerstand für beide Spulenhälften gleich wird, ist nur der Mittel des Indikatorgehäuses aus Eisen, während die Membran und die Spulenhalterung - wie bereits angeführt - aus unmagnetischem Material bestehen. Der Tauchanker liegt ebenfalls symmetrisch zu der Spulenmitte und nimmt beiderseitig die im Spulenkern befindliche Bohrung nur zu zwei Dritteln ihrer Länge ein. Dadurch wird erreicht, daß die Eichkurve vollkommen linear ist, da die Spule als unendlich lang angesehen werden kann und sich der magnetische Widerstand linear mit der Eintauchtiefe ändert.

Aus dem gleichen Grunde haben bleibende Durchbiegungen der Membran bei Überbeanspruchungen, soweit sich dadurch die Elastizität der Membran nicht ändert, nur eine Verschiebung des Nullpunktes und keine Empfindlichkeitsänderung zur Folge. Da der Aufbau zentrisch symmetrisch ist, kann ein Schwingen des Tauchankers in radialer Richtung keine Störung verursachen, was sich in der geringen Störempfindlichkeit des Gerätes angenehm bemerkbar macht. Um die Eigenfrequenz noch zu erhöhen und außerdem die Empfindlichkeit zu steigern, ist es zweckmäßig, den Körper selbst mit der Membran aus unmagnetischem Material herzustellen und die magnetische Rückführung an der Spule direkt durch eine Hülse aus weichem Eisen durchzuführen. Zur Steigerung der Empfindlichkeit sind noch zwei End- und eine Mittelscheibe aus weichem Eisen vorgesehen. Abb. 10 zeigt die Skizze eines Gerätes für 14 mm Zündkerzenbohrung. Durch die Ausarbeitung der Membran aus dem Vollen gemeinsam mit dem Indikatorkörper wird außerdem die Eigenfrequenz noch wesentlich erhöht.

Abb. 10

Die elektrische Meß- und Verstärkereinrichtung für den Indikator ist die für das induktive Trägerfrequenz-Meßverfahren gebräuchliche 13. Sie besteht (Abb. 11) im wesentlichen aus

Abb. 11

- 11 -

einen Röhrensummer 7, welcher die Trägerfrequenz liefert und die Wechselstrombrücke 8 speist. In der Brücke wird die Trägerfrequenz entsprechend der Bewegung des Tauchankers, d.h. der Druckänderung, moduliert. Die Brücke besteht in dem einen Zweig aus der Doppeldrossel 9 des Indikators, während der andere Zweig aus zwei festen Ohmschen Widerständen 9, 10 und dem einstellbaren Widerstand 11 (zum Abgleichen der Brücke) gebildet wird. Zum genauen Phasenabgleich ist eine umschaltbare Parallelkapazität vorgesehen. Infolge der symmetrischen Anordnung der Brücke, und da je ein Brückenzweig, die Doppeldrossel im Indikator und die Abgleichwiderstände, auf je gleicher Temperatur liegen, hat eine Temperaturänderung - insbesondere wie sie im Laufe eines Arbeitsspiels auftritt - keinen Einfluß auf die Brückenabstimmung und somit auf die Nulllinie und Empfindlichkeit. Außerdem ist es jederzeit möglich, die Brücke im betriebswarmen Zustand abzugleichen.

Zum Mischen der Empfindlichkeit und zur Kontrolle ihrer Reproduzierbarkeit dient ein zu- und abschaltbarer Widerstand 12, zum Verstimmen der Brücke. Ein Verstärker 4 mit Siebmitteln und Oberwellenfilter und eine Gleichrichterbrücke 5 mit nachgeschaltetem Endsieb (zur Unterdrückung der Trägerfrequenz) vervollständigen die Meßeinrichtung. Die Aufzeichnung kann entweder mit Kathoden- oder mit Schleifen-Oszillographen aufgenommen werden. Da beim Trägerfrequenzverfahren nur Frequenzen bis  $\frac{1}{5}$  der Trägerfrequenz unverzerrt aufgezeichnet werden, ist diese entsprechend hoch zu wählen.

Für die Aufnahme des pv-Diagramms eignen sich die die Schwinggeschwindigkeit aufzeichnenden induktiven Geräte weniger, da der Meßwert dann elektrisch integriert werden muß. Da diese Geräte aber zur Aufzeichnung von Klopfschwingungen sehr gut geeignet sind, sollen sie bereits hier aufgeführt werden. Abb. 12 gibt den MIT-Indikator<sup>+</sup> als Klopfanzeigegerät

Abb. 12

<sup>+</sup>) Anm. f. d. Übers.: MIT = Firmenbezeichnung.



- 12 -

wieder. Hierbei taucht eine Meßspule nach dem Prinzip des elektro-magnetischen Lautsprechers in das magnetische Feld ein, und bei auftretenden Schwingungen werden Spannungen in der Spule induziert.

### Kapazitive Meßverfahren

- Abb. 13 Auch die kapazitiven Verfahren wurden zur Aufzeichnung des pv-Diagramms verwendet. Abb. 13 zeigt die Kondensator-Druckmeßdose, mit welcher Schnauffer seine Motoruntersuchungen vorgenommen hat 14. Die Eigenfrequenz liegt infolge der Notwendigkeit, eine größere Membran zwecks Erzielung einer genügenden Empfindlichkeit zu verwenden, bei etwa 2500 Hertz. Die Meßschaltung ist die der halben Resonanzkurve nach Riegger (Abb. 14) 15. Die Kapazität des Meßgerätes bildet mit einer konstanten Selbstinduktion den Schwingungskreis des selbsterregten Röhrensenders I. Der durch die Meßkapazität veränderliche Schwingungskreis ist mit einem nach seinen Werten bekannten Schwingungskreis II gekoppelt. In diesem Kreis wird mittels einer Röhre, die als Verstärker und Gleichrichter wirkt, in bekannter Weise der Anodenstrom in einem Instrument oder der Meßschleife aufgezeichnet, wobei der Ruhestrom durch Gegenschaltung unterdrückt wird. Die Verschiebung des Meßkondensators kann statisch in Stromwerten geeicht werden.
- Abb. 14

- Abb. 15, 16 In neuerer Zeit wurde das kapazitive Verfahren mit trägerfrequenz-modulierter Brückenschaltung von der Firma Philips zu einem sehr brauchbaren Meßindikator-Verfahren ausgebaut 16. Abb. 15 zeigt den Indikator, während Abb. 16 die Meßschaltung wiedergibt. In der Wechselstrombrücke ist nur ein veränderlicher Kondensator 3 vorhanden. Außerdem ist durch die Zufuhr der Trägerfrequenz in Form von Niederspannung der Einfluß von Kapazitätsänderungen in den Zuleitungen weitgehend ausgeschaltet, so daß noch mit Meßzuleitungen von 10 bis 50 m Länge gearbeitet werden kann. Zu diesem Zwecke sind im Indikator selbst die drei festen Kapazitäten 4, 5, 6 und die Hoch-

- Abb. 17 frequenz-Transformatoren 7, 8 untergebracht sind (Abb. 17). Die Temperatur der Membran darf  $500^{\circ}$  und die des Kopfteils des Indikators mit den Transformatoren  $50^{\circ}$  nicht überschreiten. Der Vorteil dieser Meßeinrichtung liegt wie bei allen Trägerfrequenzverfahren darin, daß der Geber statisch geeicht werden kann. Da aber infolge Durchbiegung der Membran Verschiebungen der Nulllinie auftreten können, ist eine Hilfseinrichtung vorgesehen, bei der eine Spannung von einstellbarer Phase und einstellbarem Betrag der Meßwertspannung so hinzugefügt wird, daß der Wert Null im Ausgangespunkt, d.h. bei dem Druck Null, vorhanden ist. In Abb. 17 ist für diesen Zweck nach einem Vorschlag des Verfassers die Gegenschaltung einer Spannung, welche aus einer Thomson-Brücke entnommen wird und in Betrag und Phase einstellbar ist, vorgesehen. Originalschaltung des Philips-Gerätes ist nicht veröffentlicht worden. Auch läßt sich ein kapazitiver Indikator in Brückenschaltung nach Abb. 18 leicht bauen, da heute genügend Zuleitungskabel mit konstanter Kapazität zur Verfügung stehen. Abb. 19 zeigt eine Konstruktionsskizze eines Indikators für 14 mm Zündkerzenbohrung. Als Isoliermittel wird Condensa-Material<sup>+)</sup>  mit einer Dielektrizitäts-Konstanten  $= 80$  verwendet. Dadurch ist es bei entsprechendem Plattenabstand möglich, auch bei kleinem Durchmesser die nötige Grundkapazität von etwa 150 cm zu erreichen, so daß eine genügende Empfindlichkeit gewährleistet wird. Da die Membrane mit dem Körper selbst aus dem Vollen gearbeitet ist, kann die Eigenfrequenz sehr hoch gewählt werden. Die Elektrode selbst ist in einer Platte aus hochisolierendem Material gehalten. Die Durchbiegung der Membran wird zu 10 bis 15  $\mu$  bei Vollast gewählt. Es ist allerdings noch zu untersuchen, wie weit der Indikator gekühlt werden muß, damit keine Änderung in der Dielektrizitäts-Konstanten des Materials für die Zwischenisolierung auftritt.

<sup>+)</sup>  Anm. f. d. Übers.: Condensa = Markenbezeichnung.

### Klopfmessverfahren und Anzeigergeräte

Nachdem im wesentlichen alle Indikatoren und Hilfseinrichtungen besprochen wurden, soll nunmehr auf die eigentlichen Verfahren zum Messen von Klopfeschwingungen und die Anzeigergeräte übergegangen werden.

### Allgemeine Erkenntnisse über den Klopfvorgang

Nach der derzeitigen Auffassung des Klopfvorganges beginnt die klopfende Verbrennung in einer fortschreitenden Flammenfront, welche sich von der Zündkerze ausbreitet. Während dieses normalen Fortschreitens der Verbrennung besteht dauernd Druckausgleich zwischen dem verbrannten und dem unverbrannten Gemisch. Dadurch wird der unverbrannte Rest adiabatisch verdichtet und erwärmt. Beim Erreichen der Selbstzündungs-Temperatur wird der unverbrannte Rest praktisch auf einmal entzündet; der Druck kann sich nicht ausgleichen und springt daher auf einen sehr hohen Wert. Dieser plötzliche Druckenstieg, welcher nach Untersuchungen von E. Schmidt 17 in einer Zeit von etwa  $10^{-5}$  s vor sich geht, kann mit den bis jetzt verwendeten Druckmeßgeräten nicht erfaßt werden, weil sie eine viel zu niedrige Eigenfrequenz haben.

Als Klopfeschwingungen werden von den Druckmeßgeräten nur jene Druckausgleich-Schwingungen aufgezeichnet, die sich als stehende Eigenschwingungen des Verbrennungsraumes in Richtung eines Durchmessers bemerkbar machen. Da die Schallgeschwindigkeit bei den im Verbrennungsraum auftretenden Temperaturen in der Größenordnung von 1000 m/s liegt und die Abmessungen der Verbrennungsräume selbst etwa 10 cm betragen, liegen die Eigenschwingungen des Brennraumes bei einigen tausend Hertz. Schwingungen in Richtung parallel zur Zylinderachse, also senkrecht zum Kolben, wurden bereits ebenfalls beobachtet, doch liegen sie um mindestens eine Größenordnung höher und es ist daher sehr schwierig, sie zu messen.

- 15 -

Diese Schwingungen sind nur stehende Wellen ohne Temperatur- und Massenausgleich. Dies ist daraus zu ersehen, daß einmal eingebaute, dünne Trennmembranen in Richtung parallel zur Zylinderachse nicht zerstört werden (Schnauffer) 18. Außerdem aber treten Zerstörungen beim klopfenden Motor, die sich infolge der hohen Temperatur als Gefügebrauchlockerung bemerkbar machen, am Zylinder und Kolben nur an begrenzten, immer von der Zündkerze weitest entfernten Stellen auf. Außerdem gibt es am Zylinder selbst Stellen, an denen keine Druckschwingungen gemessen werden können, d.h. Knotenpunkte der stehenden Wellen.

Es läßt sich errechnen 19, daß der Druck bei der Durchzündung des Gemischrestes ein Mehrfaches des unmittelbar vor diesem Vorgang im Zylinder herrschenden Druckes erreicht. Der auftretende Druck ist um so größer, je größer bei Beginn des Klopfens bereits der Anteil des verbrannten Gemisches ist; weil dann der Ausgangsdruck des auf kleinstem Raum zusammengedrängten Gemischrestes und seine Temperatur bereits sehr hoch sind, so daß die Zündgeschwindigkeit und somit der Ausgleichsdruck entsprechend höher sind. Da der Energieanteil dagegen kleiner ist, liegt das Maximum der Anzeige von Klopf-schwingungen und der Zerstörungen bei größeren Anteilen des durchzündenden Gemischrestes. Vielleicht ist das Klingeln, welches ja zuerst auftritt, d.h. bei kleinerem Anteil des durchzündenden Gemischrestes, durch den ausgelösten harten Druckstoß zu erklären, während beim Klopfen als hörbare Erscheinung infolge der länger anhaltenden stehenden Gasschwingungen Motorenbauteile mit erregt werden.

#### Den Druckanstieg anzeigende Meßverfahren und Geräte

Die ersten Messungen, mit denen man den Beginn der Klopf-schwingungen festzustellen versuchte, wurden mit wesentlich einfacheren Geräten als den heutigen Druckindikatoren



- 16 -

Abb. 20

durchgeführt. Neben den rein akustischen Verfahren, Feststellung des Klopfbeginns (harter Gang, Klingeln usw.) mittels Gehör oder durch Temperaturneßgeräte wurden Geräte entwickelt, welche auf den plötzlichen Druckanstieg ansprechen. Für die Kraftstoffprüfung nach dem CFR-Verfahren wurde der Springstab-Indikator (Bouncing Pit) nach Midgely verwandt. Abb. 20 zeigt dieses Gerät. Der Aufspringstab 2 wird durch eine Feder auf die Membran 1 gedrückt. Treten nun im Motor Druckstöße auf, so springt der Stab in die Höhe und schließt den Kontakt 3. Die Menge des Knallgases, das aus einer Säurelösung von dem während des Klopfens fließenden Strom in einer gewissen Zeit erzeugt wird, wird als Maß für die Klopfstärke festgesetzt. Ebenso kann der Anschlag eines stark gedämpften Milliampere-meters (Hitzdraht-Instrument) im gleichen Stromkreis als Klopfmaßstab festgelegt werden.

Abb. 21

Abb. 22

Für die genaueren Untersuchungen der Treibstoffe auf Klopfbarkeit reicht aber die Untersuchung mit dem Springstab nicht aus. So interessiert insbesondere der Zeitpunkt des Klopfbeginns, d.h. die Überladung, Verdichtung usw., bis zu welcher der Motor noch gefahrlos betrieben werden kann. In Deutschland wurde für diese Zwecke insbesondere der Quarzindikator herangezogen. Bei den ersten Verfahren wurden die pv-Diagramme aufgenommen und ausgewertet. Bei günstiger Lage des Druckindikators (im Schwingungsbauch der stehenden Welle) kann man auch hieraus bereits die Schwingungszahl und Stärke entnehmen. Abb. 21 zeigt ein solches Diagramm 20, während Abb. 22 den mittleren Druckverlauf an der gleichen Stelle des Motors bei verschiedenen Klopfstärken zeigt. In neuerer Zeit wurde von der I.G. ein Klopfmeßverfahren auf dieser Grundlage für den I.G.-Prüfmotor entwickelt 21. Zur Verstärkung wird dabei eine schwingende Gassäule in einem Kanal herangezogen, dessen Eigenfrequenz gleich der Klopf Frequenz ist. Für den I.G.-Motor beträgt die günstigste Länge dieses Stützens 40 mm bei 8 mm Durchmesser. Außerdem werden die Grundfrequenz und die niederen Harmonischen, d.h. das eigentliche pv-Diagramm,

Abb. 23

ausgesiebt. Abb. 23 zeigt Aufnahmen, welche nach diesem Verfahren bei verschiedenen Verdichtungen ermittelt wurden, während Abb. 24 die Schaltung des Gerätes bei Verwendung eines Thermo-Umformers mit großer Zeitkonstanten als Anzeigeeinstrument wiedergibt. Die Grundfrequenz wird bei Verwendung einer Quarzdose als Geber in einfacher Weise durch die Bemessung des Eingangswiderstandes ( $R = 10^6$ ) ausgesiebt. Ein anderer Weg ist der, die Verstärkerschwingungen gleich zu richten und einen Kondensator damit aufzuladen. Der Entladewiderstand wird so bemessen, daß sich der Kondensator nur langsam entlädt. Die Spannung des Kondensators liegt am Gitter eines Endrohres, dessen Anodenstrom von einem Instrument gemessen wird, wobei der Ruhestrom kompensiert ist. Abb. 25 zeigt die Schaltung, während Abb. 26 den Vergleich verschiedener Oktanzahlmessungen mit Messungen mittels des Springstab-Indikators zeigt. Daraus ist zu ersehen, daß die Genauigkeit in diesem Zustand der Entwicklung nicht viel über der des Springstab-Indikators liegt.

Abb. 25

Abb. 26

Im Ausland wurden in der Hauptsache die Druckmeßgeräte nach dem Induktionsverfahren, z.B. das MIT-Klopfanzeigegerät (Abb. 12) und der Sunbury-Indikator, verwendet. Da bei diesen Geräten die elektromotorische Kraft um so größer ist, je rascher der Druck ansteigt, d.h. je größer die Amplitude der Klopferschwingung ist, so kann für bestimmte Spannungen, d.h. Klopferschwingungsamplituden, ein Glimmrohr oder Stromtor zum Zünden gebracht werden und als Anzeige des Klopfbeginns benutzt werden.

Abb. 27

Vom Verfasser selbst wurde der in Abb. 9 11 dargestellte induktive Druckindikator ebenfalls als Klopfmeßgerät verwendet. Dabei wird nur eine Spule des Differentialsystems mit Gleichstrom erregt und nach Abb. 27 geschaltet. Nach dem elektrodynamischen Prinzip wird durch die Bewegung des Tauchankers eine Wechselspannung in der Spule induziert, welche sich der Gleichspannung überlagert. Da bei dieser Anordnung die Eigen-



- 18 -

schwingungszahl der Membran durch die Spule nicht mehr herabgesetzt wird, kann diese so groß ausgeführt werden, daß mit dem Gerät eine genügende Empfindlichkeit erzielt wird. Ebenso kann der empfindlichste Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskurve durch Änderung der Gleichstromerregung eingestellt werden. Die Eigenschwingungszahl des Klopfergerätes ist fast nur durch die Dimensionen der Membran bedingt, da ja der kleine Tauchanker, welcher übrigens als Rührchen ausgeführt werden kann, keine wesentlichen Änderungen bewirkt. Die Membran kann leicht mit 30 000 Hertz Eigenfrequenz hergestellt werden, und da die Eigenschwingungen des Tauchankers in radialer Richtung keine Störungen mit sich bringen, ist die Anfälligkeit des Gerätes gegen Störungen gering. Durch die Fremderregung mit Gleichstrom in der Spule wird gleichzeitig eine Dämpfung jeder auftretenden Schwingung erreicht. Die elektrische Schaltung ist aus Abb. 27 zu ersehen. Eine Gleichstrombatterie 5 speist die Spule über einen genügend hohen Widerstand 6 oder eine Drossel 7, welche verhindern, daß sich die auftretenden Wechselspannungen über die Batterie kurzschließen. Die Erregung kann veränderlich eingestellt werden und wird mit Hilfe des Strommessers 8 festgelegt. Die Wechselspannung wird dem Verstärker zugeführt. Da jedem Wechselstromverstärker am Eingang zur Blockierung der Gleichspannung ein Kondensator 9 vorgeschaltet ist und das Gitter über Widerstände 10 mit der Kathode verbunden ist, wird bereits hier bei geeigneter Bemessung des RC-Gliedes eine Differentiation vorgenommen.

Da der Indikator bei der oben angeführten Schaltung bereits das  $dp/dt$ -Diagramm in seiner Wechselspannung anzeigt, wird vom Verstärker das  $d^2p/dt^2$ -Diagramm abgegriffen. Ebenso läßt sich auch mit elektrischen Mitteln eine Integration und somit die Aufzeichnung des  $pv$ -Diagramms erreichen.

Da eine genaue Auswertung der Diagramme nur dann von Wert ist, wenn neben der trägheitsfreien Druck- und Schwingungsanzeige auch die genaue Zuordnung zur Zeitachse und zum Totpunkt

der Maschine möglich ist, soll noch eine einfache Totpunktmarkierung angeführt werden. Wird nämlich eine Spule mit wenig Windungen in Reihe mit der erregten Induktorspule geschaltet, so kann durch einen mit Motordrehzahl umlaufenden Eisenstab in bekannter Weise durch den Induktionsstoß die Totpunktmarkierung oder bei mehrfacher Anordnung eine Einteilung der Aufzeichnung in Kurbelwinkelgrade vorgenommen werden.

## Abb. 28

Abb. 28 zeigt mit diesem Indikator aufgenommene Oszillogramme, bei Klopfbeginn nach Gehör (Bleibenzin Oktan 87, Verdichtung = 6,62) im CFR-Motor und bei klopfendem Betrieb (Oktan 64, Verdichtung = 5,7). Die Auswertung der Schwingungszahl ergibt 6800 bis 7000 Hertz, was mit den Untersuchungen von C. S. Draper 22 gut übereinstimmt. Dieser hat für den CFR-Prüfmotor 6800 Hertz Eigenschwingung berechnet und festgestellt, wobei die Änderungen der Frequenz infolge Erhöhung der Schallgeschwindigkeit durch Temperatursteigerung noch zu berücksichtigen sind.

Meßverfahren, die einen Trieb im Ladedruck- und Verdichtungsdiagramm aufweisen

In neuerer Zeit ging man in der Praxis dazu über, Klopfmeßgeräte zu entwickeln, welche den Klopfbeginn viel genauer als mit dem Springstab-Indikator festzulegen gestatten. So wurde der Weg, das Klopfen aus der Veränderung im Druck-Zeit-Diagramm zu erfassen (Abb. 22) weiter ausgebaut und vervollkommen. Da aber im Druck-Zeit-Diagramm diese Änderung zu klein ist, wurde von Dodds, Illgen und Mintze die elektrische Differentiation durchgeführt 23; 24. Bessere Ergebnisse zeigen aber Versuche von Seeber und Lichtenberger mit zweifacher Differentiation, d.h. das Aufzeichnen des  $d^2p/dt^2$ -Diagramms 28, da hierbei die Unterschiede zwischen Klopfen und Nichtklopfen um eine Größenordnung wachsen. Trägt man z.B. die Amplitude über dem Ladedruck auf, so erhält man beim Klopfbeginn einen

Abb. 29 eindeutigen Knick (Abb. 29). Dieser Knick kann auch bei anderen Meßverfahren festgestellt werden. Schütz 25 stellte bei der Aufnahme der Brenngeschwindigkeit (von Schütz vereinfachtes Ionisationsverfahren nach Schnauffer) ebenfalls einen Knick bei Klopfbeginn fest. Ebenso ergibt sich, wie später noch ausgeführt wird, bei der Messung der Zylindertemperatur mittels Meßstopfens ein deutlicher Knick bei Klopfbeginn.

Abb. 30 Die selbständige elektrische Differentiation kann auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Wenn wie in Abb. 30 der Meßwert z.B.  $dp/dt$  auf das Gitter einer Röhre gegeben wird, dann kann an der Drossel im Ausgangskreis als Spannung  $d^2p/dt^2$  abgegriffen werden. Diese Differentiation ist soweit genau, wie der Widerstand der mit geringer Kapazität gewickelten Drossel als verhältnismäßig klein angesehen werden kann. Da aber in der Anzeige die einzelnen Klopfstöße unregelmäßig sind und bei gleicher Einstellung um etwa 100 % und mehr in der Amplitude streuen, so ist eine genaue Auswertung der Einzel-Diagramme schwer möglich. Daher ist es wieder zweckmäßig, wie in Abb. 25 einen Kondensator aufzuladen und die Ladespannung als Stromwert über einen Tintenschreiber aufzuzeichnen. Abb. 31 zeigt eine solche Aufzeichnung. Daraus kann bereits der Knick und somit der Klopfbeginn festgestellt werden.

Die theoretische Begründung für das Auftreten des Knickes bei Klopfbeginn wurde von Jost und von F. A. F. Schmidt 26; 27 aufgestellt. Für die genaue Betrachtung muß auf die Originalarbeiten verwiesen werden. Im wesentlichen ist der Vorgang so, daß der Druck vor Klopfbeginn einer Funktion  $p = f(t, p_0, T_0)$  unterliegt, worin  $p$  der Zylinderdruck,  $t$  die Zeit,  $p_0$  der Anfangsdruck (Ansaugedruck) und  $T_0$  die Anfangstemperatur

bedeuten. Sobald sich nun die Verbrennungsart bei Klopfbeginn ändert, folgt der Druck  $p$  einer anderen Funktion  $p = F(t, p_0, T_0)$ , wobei beide Funktionen im Augenblick der Durchzündung gleiche Werte haben. Im wesentlichen liegt der Unterschied im

- 21 -

Exponenten. Bei der Ableitung der Funktion tritt eine Änderung der Neigung auf, die sich bei der zweiten Ableitung bereits als deutlicher Knick kenntlich macht. Eine höhere Ableitung, welche sich aber schwieriger darstellen läßt, würde eine noch größere Steilheit im Knick ergeben.

Abb. 32

Abb. 32 ist eine Zusammenstellung einiger Aufnahmen aus der Arbeit von Lichtenberger und Seeber 28, aus der deutlich das Verhalten zu erkennen ist. Die seitlichen Maßstäbe lassen erkennen, in welcher Größenordnung sich durch die zweite Differentiation das Verhältnis zwischen klopfendem und nicht-klopfendem Betrieb ändert.

Wie bereits erwähnt, läßt sich auch durch thermische Messungen bei Klopfbeginn ein Knick feststellen. Diese Versuche wurden an der Technischen Hochschule Dresden im Institut für Kraftfahrzeugwesen zu dem Zwecke durchgeführt, im Mehrzylinder-Otto-Motor auf einfache Weise den Klopfbeginn aller Zylinder gleichzeitig festzustellen. E. Schmidt 17 und R. Sinn 29 haben nachgewiesen, daß die Wärmeübergangszahl mit der Klopf-schwingung stark zunimmt. Es wird dies damit erklärt, daß das bis an die Wandungen heran verbrannte Gas durch den plötzlich auftretenden Druckstoß adiabatisch verdichtet wird und somit eine noch höhere Temperatur erreicht. Da außerdem die heißen Schichten immer näher an die Wand herangedrückt werden, steigt die Temperatur weiter an. Der Temperaturgradient wächst nach Berechnungen von E. Schmidt auf ungefähr das Dreifache gegenüber dem der normalen Verbrennung an, so daß somit im Mittel 50 % mehr Wärme an das Kühlwasser abgegeben wird als bei nichtklopfendem Betrieb.

Abb. 33

Auf Grund dieser Überlegungen wurde ein Meßstopfen entwickelt, der eine Messung der Temperatur an der Innenwand des Zylinders zuläßt, d.h. an der Stelle, an welcher sich die Temperaturerhöhung zuerst bemerkbar macht. Abb. 33 zeigt diesen Meßstopfen, der zuerst am I.G.-Prüfmotor anstelle des Spring-



Abb. 34

stab-Indikators eingesetzt wurde. Abb. 34 gibt eine neuere Ausführung wieder. Der Thermostrom wird über einen Widerstand von einem Galvanometer gemessen.

Abb. 35

Bei der Erprobung im Einzylinder-Motor wurde so vorgegangen, daß nach der Veränderung des Verdichtungsverhältnisses am laufenden Motor nach einer gewissen Einlaufzeit die Temperatur abgelesen und im Diagramm aufgetragen wurde (Abb. 35). Wie im Versuchs-Bericht angeführt ist, konnte bei der Kontrolle mit anderen Meßgeräten vollkommene Übereinstimmung erzielt werden und der Klopfer bereits vor Eintreten des hörbaren Klopfbeginns festgestellt werden.

#### Klopfmeßverfahren für Motoruntersuchungen ohne Induziereinrichtungen

Allen vorher angeführten Verfahren haftet der Nachteil an, daß außer der Zündkerzenbohrung an der Stelle, wo die Durchzündung des noch unverbrannten Gemisches auftritt, noch eine Bohrung vorhanden sein muß, um ein Anzeigemeßgerät einsetzen zu können. Es können daher alle diese Versuche nur an besonders vorbereiteten Motoren vorgenommen werden. An Motoren aus der Serienherstellung und insbesondere bei Vielzylindermotoren sind solche Untersuchungen undurchführbar. Außerdem ist es auch bei genauer Eichung des Druckgerätes an einem Motor nicht möglich, die Meßkurven für die Auswertung bei Messungen an anderen, wenn auch gleich gebauten Motoren zu verwenden. Es muß also jedeszeit eine Neueichung zur Festlegung der Meßwerte beim Umsetzen des Gerätes auf andere Motoren durchgeführt werden. Ebenso ist es leicht möglich, beim Einbau des Druckindikators eine Stelle zu treffen, an welcher überhaupt keine Druckschwankungen auftreten (Knotenstelle in der stehenden Welle). Daher ist es insbesondere für schnelllaufende Vielzylindermotoren am zweckmäßigsten, wenn man zwecks Feststellung des Klopfverhaltens der einzelnen Zylinder

- 23 -

mit dem Meßgerät nur die durch die Klopferschwingungen erregten Motoranteil-Schwingungen von außen ohne Eingriff am Motor selbst aufnimmt. Es eignen sich dazu sowohl die induktiven, kapazitiven als auch die akustischen Meßverfahren.

### Induktives Schwingungsaufnahmegerät

Vom Verfasser wurde ein Meßverfahren aufgezeigt 30, welches es gestattet, mit bereits bekannten und erprobten Meßgeräten in einfacher Weise die beim Klopfen des Motors auftretenden Schwingungen am Zylinderkopf oder anderen Teilen des Motors aufzunehmen und aufzuzeichnen. Als Aufnahmegerät für die auftretenden Schwingungen wurde eine gewöhnliche Schallplatten-Wiedergabedose verwendet, wobei die Nadel direkt auf das Gehäuse oder den Zylinderkopf aufgesetzt wird. Um ein Abheben der Nadel bei den auftretenden Beschleunigungen zu verhindern, wird die Meßdose durch ein federndes Glied aufgedrückt. Bild 36 zeigt beispielsweise das Meßgerät am Zylinderkopf eines luftgekühlten Flugmotors, wobei die Federung durch einen starken Gummischlauch erzielt wurde. Das Oszillogramm 1 in Abb. 37 zeigt eine Aufnahme der Gesamtschwingung eines klopfenden Motors, während Oszillogramm a in Abb. 38 an demselben Motor in nichtklopfendem Betrieb aufgenommen wurde. Es lassen sich wohl schon aus diesen beiden Oszillogrammen, bei denen die von der Meßdose aufgenommenen Schwingungen nur durch einen Wechselstromverstärker vom Schleifenoszillographen aufgezeichnet werden, bedeutende Unterschiede in den Schwingungsamplituden feststellen.

Abb. 36

Abb. 37

Abb. 38

Da bei diesem Verfahren nicht der Schwingungsverlauf des Gases im Verbrennungsraum aufgenommen wird, sondern die durch die Druckschwankungen mehr oder weniger angeregten Schwingungen der einzelnen Motorerteile, ist es zweckmäßig, die Gesamtschwingung zu analysieren. Dies ist um so mehr notwendig, als dadurch festgestellt werden kann, welche auftretende Schwingung



- 24 -

den größten Unterschied in der Amplitude zwischen klopfendem und nichtklopfendem Betrieb aufweist und somit am besten zur Anzeige des Klopfbeginns verwendet werden kann.

Abb. 39

Mit Hilfe eines Oktavsiebes von Siemens & Halske, welches aus einer Reihe von Siebketten mit der Bandbreite einer Oktave besteht, kann die Analyse am leichtesten durchgeführt werden. Abb. 39 zeigt die Betriebsdämpfungskurven des Oktavsiebes für 2 x 8 Oktaven. Um einen Vergleich mit den bereits durchgeführten Klopfuntersuchungen zu ermöglichen 12, wurde zuerst wieder ein GPR-Motor unter den gleichen Bedingungen wie in der früheren Arbeit untersucht. Die Meßdose wurde am Zylinderkopf ähnlich Abb. 36 angebracht. Abb. 37 zeigt die Aufnahme der gesamten Schwingung und ihrer Analyse. Der Motor war bei 900 U/min so eingestellt, daß das Knockmeter einen Ausschlag von 50 anzeigt. Der Zündzeitpunkt ist in den Oszillogrammen deutlich an dem Hochspringen der aufgezeichneten Kurven zu erkennen. Kabel und Dose wurden hier absichtlich nicht geschirmt, damit der genaue Zündzeitpunkt festgestellt werden konnte. Die einzelnen Oszillogramme der verschiedenen Oktaven sind nacheinander aufgenommen worden, doch läuft der Motor auch im Klopfzustand sehr stabil, so daß sich die einzelnen Arbeitsspiele nicht sehr unterscheiden.

Die Analyse des Klopferschwingungsbeginns zeigt, daß er durch eine steile Wellenfront, welche sich akustisch in dem harten Klopfschlag bemerkbar macht, eingeleitet wird. Darüber lagern sich die einzelnen Frequenzen, mit denen der Zylinderkopf und die anderen Motorerteile schwingen. Den größten Ausschlag ergibt die Schwingung f in Abb. 37 bei einer Frequenz von etwa 660 Hertz. In Abb. 38 sind Oszillogramme von Motorschwingungen der Übersichtlichkeit wegen nur in drei Oktaven aufgezeichnet. Die Kurven a bis d in Abb. 38 zeigen den Motor im klopfreien Zustand (nach Gehör), während ihn die Kurven e bis h in einem Klopfzustand mit Knockmeterausschlag 50 zeigen. Auch hier wird wieder bestätigt, daß der Schwingungsbe-

- 25 -

ginn mit dem hörbaren Klopfbeginn nicht identisch ist, sondern daß die charakteristischen Schwingungen bereits vor dem hörbaren Klopfbeginn auftreten.

Abb. 40

Der Vollständigkeit halber sind in Abb. 40 Oszillogramme von einem Einzylinder-Flugmotor wiedergegeben. Die Schwingungen wurden hier, da der Zylinder vollständig gekapselt war, an Lagerschild abgegriffen. Kurve a zeigt den Motor während des Warmlaufens bei  $n = 2500$  U/min. Die Frequenz, welche hier (mit dem Sieb 800 bis 1600 Hz aufgenommen) im Arbeitshub angezeigt wird, beträgt 1330 Hz. Die Kurve b zeigt den Motor an der Klopfgrenze im harten Gang ( $n = 2700$  U/min), während Kurve c den Motor im Klopfzustand wiedergibt ( $n = 2700$  U/min).

Das Verfahren konnte vom Verfasser wegen anderer dringlicher Aufgaben nicht weiter verfolgt und ausgebaut werden.

#### Akustisches Aufnahme-Verfahren

Zu gleicher Zeit wurde von A. W. Schmidt 31; 32; 33 das auf gleichem Prinzip beruhende, nur mittels akustischem Aufnahmegerät arbeitendes Meßverfahren entwickelt und für die Reihenuntersuchungen von schnellaufenden Motoren, insbesondere Fahrzeugmotoren, ausgebaut. Auch hier wird eine Siebung vorgenommen zur Unterdrückung der allgemein auftretenden Geräusche und zur genauen Unterscheidung der wirklich interessierenden Frequenzen, d.h. der durch die Gasschwingungen erregten Schwingungen von Motorenteilen. Um eine starke Ausiebung der Störfrequenz zu erreichen, werden die Siebgeräte mit einer großen selektiven Verstärkung ausgestattet. Da außerdem das Gerät universell verwendet werden soll, sind diese Siebgeräte abstimbar vorgesehen (etwa zwischen 700 bis 4000 Hertz für Prüfstandsversuche; für Betriebsversuche an Motoren selbst, z.B. für Fahrtversuche, zwischen 1 bis 50 KHertz).

Abb. 41

Abb. 42

Abb. 43

Abb. 44

Abb. 45

Abb. 41 zeigt das entwickelte Meßgerät. Das akustische Aufnahmegerät ist als piezoelektrischer Beschleunigungsmesser aufgebaut. Abb. 42 zeigt einen Schnitt durch ein solches Gerät. (Da die Veröffentlichung des Originalgerätes nicht greifbar ist, ist ein eigener Vorschlag wiedergegeben.) Als Anzeigegerät wird ein Piezocuar mit vorgespannter Hülse (Abb. 23) verwendet, welcher durch die bei Beschleunigung an der Masse auftretenden Kräfte mehr oder weniger entlastet wird. Die auftretenden Ladesspannungen werden in bekannter Weise dem Kathodenstrahl-Oszillographen zugeführt. Die im Gerät vorgesehene Membran dient nur als Stütze, um ein Zucken der geführten Masse zu verhindern. Abb. 43 zeigt Klopfbilder vom Einzylinder-Prüfmotor bei verschiedenen Verdichtungen, während Abb. 44 mit dem Gerät durchgeführte Klopfmessungen an verschiedenen Benzinen wiedergibt. Bei Vergleichsversuchen ergab sich, daß die Genauigkeit trotz der so einfachen und vielseitig verwendbaren Anordnung etwa mit der des Springstab-Indikators übereinstimmt. Von A. W. Schmidt und seinen Mitarbeitern wurden mit diesen Verfahren viele Betriebe-Versuche, insbesondere in der Ebene, am Berg, bei Beschleunigungen usw. durchgeführt. Es wurde das Klopfverhalten der einzelnen Zylinder in Bezug auf die gleichmäßige Brennstoffzufuhr untersucht und Oktanzahlbestimmungen an Mehrzylindermotoren selbst durchgeführt. Abb. 45 zeigt Aufnahmen von Klopferschwingungen an einem Vier-Zylinder-Fahrzeugmotor während der Fahrt auf der Landstraße. Unter den verschiedensten Belastungsverhältnissen wurde hier der Klopfbeginn des Motors hervorgehoben. Es zeigt sich, daß immer dieselben Zylinder wie am Prüfstand zum Klopfen neigen, da sich die Gemischzufuhr und die Verschiedenheit in der Zusammensetzung des Gemisches auch in Fahrbetrieb nicht wesentlich ändert.

Bei allen Diagrammen wird meistens zwecks leichter Auswertung und Festlegung der Zylinderreihenfolge die Zündung eines Zylinders mit aufgezeichnet, während die anderen Zündungen zur besseren Übersicht durch Abschirmung der Leitungen unterdrückt werden. Um auch die Brauchbarkeit des Verfahrens

Abb. 46

unter den schwierigsten Bedingungen darzustellen, sind in Abb. 46 Aufnahmen von einem Kinnlinder-Flugmotor wiedergegeben. Der Klopfschlag ist deutlich aus dem Gesamtgeräuschbild zu erkennen. Der schmale, große Ausschlag ist die Markierung des Zündfunken, die kleineren Ausschläge rechts und links stammen von den Ventilgeräuschen (Abb. 40).

#### Kapazitives und induktives Trägerfrequenz-Aufnahmegerät

Abb. 47

Ebenso ist es aber auch leicht möglich, zur Aufnahme der Schwingung das kapazitive oder induktive Trägerfrequenz-Messverfahren zu verwenden, wie es bereits anderweitig für Beschleunigungsmessungen verwendet wurde 34. Abb. 47 zeigt den Vorschlag für eine kapazitive Aufnahmedose, welche in Schaltung nach Abb. 18 betrieben wird. Bei diesem Verfahren werden höhere Schwingungen als die der Trägerfrequenz bereits nicht mehr angezeigt. Das veränderliche Störfrequenzsieb muß hier nach der Gleichrichtung vorgesehen werden. Die Wirkungsweise des Meßgerätes ist wohl aus der Abbildung zu ersehen. In einem Gehäuse, das aus dem Bodenteil 6 und dem Oberteil 7 besteht, ist ein Ringkörper eingeschraubt, der die Membranen 17 mit der trägen Masse 12 enthält. (Die Masse wird für diesen Verwendungszweck besser als langer Zylinder ausgeführt wie in Abb. 42). Durch den aufgepressten Isoliering 3 wird eine Elektrode 4 in festem Abstände über der Massenelektrode 5 gehalten. Ein Anschluß für das Zuführungskabel konstanter Kapazität vervollständigt das Gerät.

Auf gleiche Weise läßt sich leicht ein induktives Trägerfrequenzgerät als Beschleunigungsmesser, in diesem Falle sogar mit bedeutend kleineren Abmessungen, herstellen 35. Als Anzeigegerät wird ein Längenmeßgerät eingebaut.



- 28 -

### Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß für die Weiterentwicklung der Verbrennungskraftmaschinen und für die Untersuchungen des motorischen Verhaltens neuer Kraftstoffe in den bereits entwickelten oder vorgeschlagenen Meßgeräten der Forschung und der Praxis genügend Hilfsmittel zur Verfügung stehen.

Für die Einzeluntersuchungen am Prüfstandsmotor ist mit dem Piezo-Quarz ein sehr brauchbares Meßgerät entwickelt worden, während sich für die Klopf-Untersuchungen an Serienmotoren die Verfahren zur Aufzeichnung der erregten Motorenteil-Schwingungen am besten eignen.

gez. Dr. Josef Ratzke  
Berlin-Adlershof

Schrifttum - Verzeichnis

- 1 E. J. de Juhasz: The engine Indikator. New York 1934
- 2 J.H. Collins jr.: Alterations and Tests of the "Farnbor"  
(1930) NACA, TN Nr. 748.
- 3 E. S. Taylor und  
C. S. Draper: A New High-Speed Indicator, Mechanical  
Engineering, March 1933.
- 4 R. Brandt und  
H. Viehmann: Der DVI-Glimmlampen-Indikator und  
seine Anwendung. Kraftfahrtechnische  
Forschungsarbeiten, Heft 8.
- M. Schenckmeyer: Meßgeräte zur Untersuchung der Arbeits-  
vorgänge in schnelllaufenden Verbrennungs-  
motoren. Jahrbuch der dr. Luftfahrt-  
forschung II S. 258.
- 5 W. Glammann und  
H. Treibnigg: Der tragheitslose elektrische Halbleiter-  
Indikator für Druckmessungen.  
Forschg.Ing.Wes. Bd. 4(1933) S. 137.
- 6 J. Kluge und  
H. E. Link: Piezo-elektrische Messungen von Druck-  
und Beschleunigungskräften. Z.VDI,  
Bd. 73 (1929) S. 1311.
- 7 Dieselben: Piezo-elektrische Messung mechanischer  
Größen. Forschg.Ing.Wes.Bd. 2 (1931)  
S. 103.
- 8 Dieselben: Piezo-elektrische Druckmessungen mit  
der Braunschen Röhre. Forschg.Ing.Wes.  
Bd. 4 (1933) S. 177.
- 9 S. Meurer: Neuere Mittel zur Untersuchung der  
Vorgänge im Motor. Berichtsheft der  
74. Hauptversammlung des VDI, Berlin  
1936, S. 242.
- 10 S. Meurer: Beitrag zum Bau piezo-elektrischer In-  
dikatoren. Forschg.Ing.Wes. Bd. 8  
(1937) S. 249.
- 11 L. Bisanz: Beitrag zur Entwicklung des Quarz-Indi-  
kators und seine Anwendung. Kraft-  
fahrtechnische Forschungsarbeiten,  
Heft 8.



- 30 -

- 12 J. Ratzke: Ein elektromagnetischer Indikator und Klopfmesser. Jahrbuch der dt. Luftfahrtforschg. II. S. 368 (1938).
- 13 Derselbe: Ein neuer elektrischer, dynamischer Dehnungsmesser. Jahrbuch 1937 der dt. Luftfahrtforschg. II S. 278.
- 14 K. Schnauffer: Aufzeichnung rasch verlaufender Druckvorgänge mittels Verfahrens der halben Resonanzkurve. Jahrbuch 1930 der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, S. 304.
- 15 H. Riegger: Über klangtreue Schallaufnahmen-Verstärkung und Wiedergabe. Z.f.techn. Physik Bd. 5 (1924).
- 16 H. V. Philips: Gloeilampenfabrieken, Eindhoven. Informationsschrift über Kathodenstrahl-Druckindikator G. M. 3154.
- 17 E. Schmidt: Über das Klopfen und die damit verbundene Verminderung des Wirkungsgrades von Otto-Motoren. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, Heft 9 (1939) S. 215.
- 18 K. Schnauffer: Im Diskussionsbeitrag zu dem unter 17 angeführten Vortrag von E. Schmidt
- 19 G. Danköbler: Gasbewegung in einem geschlossenen Verbrennungsraum bei einzeitiger Zündung. Jahrbuch 1938 der Deutschen Luftfahrtforschung II S. 62.
- 20 J. J. Broeze, H. van Driel und L. A. Pelotier: Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung Heft 9 (1939) S. 187.
- 21 E. Schuch: Über Versuche zur Bestimmung der Klopfstärke. Bericht über die Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung, Juli 1941. Herausgegeben von der I.G.-Farben A.G., Ludwigshafen/Rhein.
- 22 C. S. Draper: Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine. Journal of the Aeronautical Science, April 1938.

- 23 E. M. Doads: Some results obtained on the cathode ray engine indicator. J. Roy. Aeronautical Soc. Bd. 41 (Febr. 1937) Nr. 314 S. 132.
- 24 H. Illgen und H. Hintze: Beitrag zur Prüfung von Brennstoffen mittels des piezo-elektrischen Indikators. Deutsche Motor-Z., Bd. 14 (1937) Heft 14, S. 372.
- 25 R. Schütz: Messung der Klopfestigkeit an Otto-Motoren. Deutsche Kraftfahrtforschung, Heft 37, (1939) VDI-Verlag.
- 26 W. Jost: Verbrennungsvorgänge in Gasen. Angewandte Chemie, Jahrgang 51 (1938) Nr. 40 S. 687.
- 27 F.A.F. Schmidt: Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung von Verbrennungsvorgängen im Zylinder- und Diesel-Motor. Luftfahrtforschung Bd. 14 (1937) Heft 12, S. 641.
- 28 F. Seiber und F. Lichtenberger: Klopfmessung mit dem DVL-Verfahren der Druckbeschleunigung. Kraftstoff Jg. 1941 Heft 6/7.
- 29 R. Sinn: Wärmeübergang bei schwingenden Gasen, 2. VDI Bd. 83 Nr. 45 (1939).
- 30 J. Ratzke: Beitrag zur Messung von Klopferschwingungen. Motortechn. Z. (MTZ) Bd. 6 (1940) S. 4.
- 31 A. W. Schmidt und K. Genorlich: Untersuchung der Klopfgeräusche von Otto-Motoren mit elektro-akustischen Meßgeräten. Deutsche Kraftfahrtforschung 1939, Heft 33.
- 32 P. Funk: Elektro-akustische Bestimmung des Klopfverhaltens. ATZ, Jg. 1942, Heft 2
- 33 A. W. Schmidt: Zylinderzahl- und Mehrzylinder-Motor. ATZ, Jg. 1942, Heft 2, S. 26
- 34 F. I. Meister: Untersuchungen zur Schaffung geeigneter Kraftfahrzeug- und Flugzeug-Schwindungsmesser. Deutsche Kraftfahrtforschung, Techn. Bericht Nr. 26.
- 35 J. Ratzke: Neue elektr. Meßgeräte mit Trägerfrequenzmodulation. Die Meßtechnik Bd. 15 (1939) S. 209.

Abbildungsunterschriften

- Abb. 1. Kohle-Druckmessmanometer nach Glamann und Triebnigg  
 1 Gehäuse 4 Wasserkühlung  
 2 Deckel 5 Abschlußmembran  
 3 Halbleitersäule 6 Hauptmembran
- Abb. 2. Quarz-Indikator (Hülzenbauart)
- Abb. 3. Quarz-Indikator (Hülzenbauart mit Wasserkühlung)  
 1 Quarze 5 Kühlwasserzuführung  
 2 Elektroden 6 Bernstein-Isolation  
 3 Hülse 7 Ableitungs-Elektrode  
 4 Abdichtmembran
- Abb. 4. Schaltplan einer piezo-elektrischen Indiziereinrichtung mit 3stufigen Verstärker und Schleifen-Oszillographen (Schematisch als Batteriegerät)  
 1 Eichgerät für gleiche 4 Meßschleife  
   Spannungstufen 5 Ausschlag für Meßschleife  
 2 Einstellung der  
   Grundspannung  
 3 Kompensation
- Abb. 5. Einfluß der Schleifendämpfung auf die Diagrammgestaltung  
 - Dämpfungsgrad
- Abb. 6. Nacheilungswinkel verschiedener Schleifenbauarten, abhängig von der Frequenz
- Abb. 7. Schnitt durch einen Geber für induktive Druckmessung  
 1 Indikator Kolben 4 Anker  
 2 Übertragungsstempel 5 Drosselspule  
 3 Hauptmembran 6 Anschluß an eine Wechselstrombrücke
- Abb. 8. Induktiver Indikator
- Abb. 9. Schnitt durch einen induktiven Indikator nach Abb. 8  
 1 Indikatorgehäuse 5 elektr. Doppeldrossel  
 2 Membran 6 Spulenkern  
 3 Tauchanker 7 Spulenhalterung  
 4 Dichtungsring 8 Ableitungen  
 9 Stutzen für Kühlluft-Zufuhr
- Abb. 10. Induktiver Indikator mit aus dem Vollen herausgearbeiteter Membran  
 1 Gehäuse 5 Anker aus Weicheisen  
 2 Spulenhalterung 6 Hülse aus Weicheisen  
 3 Ankerfortsatz 7 Isolation mit Ableitungen  
 4 Scheiben aus Weicheisen 8 Differential-Drosselspule

- Abb. 11.** Elektrische Trägerfrequenz-Brückenschaltung mit Verstärkereinrichtung und Gleichrichterbrücke für induktiven Indikator
- |                       |   |
|-----------------------|---|
| 1 Tauchanker          | 7 Brücke                                |
| 2 Membran             | 8 Oszillograph                          |
| 3 Doppel-Drossel      | 9, 10: feste Widerstände                |
| 4 Verstärker          | 11 einstellbarer Widerstand             |
| 5 Gleichrichterbrücke | 12 Widerstand zum Verstimmen der Brücke |
| 6 Röhren-Summer       |   |
- Abb. 12.** Schnitt durch das MIT-Klopfanzeigegerät
- |                        |                                   |
|------------------------|-----------------------------------|
| 1 Meßspule             | 5 Isolierstück für Stromzuführung |
| 2 Weicheisenkern       | 6 Aluminiumträger                 |
| 3 Stahlmembran         | 7 Gehäuse                         |
| 4 Spule für Magnetfeld | 8 Kühlluftzuführung               |
- Abb. 13.** Geberkondensator für oszillierende Brücke (nach Schnauffer)
- |                |                       |
|----------------|-----------------------|
| 1 Isolierring  | 4 Abdichtmembran      |
| 2 Hauptmembran | 5 Übertragungsstempel |
| 3 Gehäuse      | 6 Elektrodenzuführung |
- Abb. 14.** Meßschaltung der halben Resonanzkurve nach Biegger
- Abb. 15.** Philips Druckaufnehmer GM 5561
- Abb. 16.** Schematische Darstellung der Brückenschaltung für Philips Druckaufnehmer nach Abb. 15  
Zahlenerklärung siehe Abb. 17
- Abb. 17.** Meßbrückenschalter für den kapazitiven trägerfrequenzgespeisten Druckindikator von Philips
- |  |
|--|
| 1 Indikator mit Hochfrequenz-Transformatoren $T_1, T_2$  |
| 2 Kathodenstrahl-Oszillograph-Ausgang mit Trägerfrequenz und Verstärker sowie Thomsenbrücke zum Nullabgleich |
| 3, 4, 5, 6 Brücken-Kapazitäten   |
| 7, 8 Hochfrequenz-Transformatoren  |
- Abb. 18.** Skizze des Trägerfrequenz-Meßbrücken-Verstärkers für kapazitiven Druckindikator nach Abb. 19
- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1 Summer                      | 4 Oszillograph                   |
| 2 Brücke                      | 5 Kabel mit konstanter Kapazität |
| 3 Verstärker u. Gleichrichter | 6 Geber                          |
- Abb. 19.** Kapazitiver Druckindikator
- |             |   |
|-------------|---|
| 1 Gehäuse   | 3 Isolation mit hoher Dielektrizitäts-Konstante |
| 2 Elektrode | 4 Isolation                                     |
- Abb. 20.** Springstab-Indikator
- |                  |                    |
|------------------|--------------------|
| 1 Membran        | 4 Lampe            |
| 2 Aufspring-Stab | 5 Einstellschraube |
| 3 Kontakt        | 6 Elektroden       |



- Abb. 21. P<sub>v</sub>-Diagramm eines klopfenden Motors
- Abb. 22. Mittelwerts-Diagramm im Zustand des Klopfens bei verschiedenen Verdichtungen
- Abb. 23. Klopff-Diagramme, aufgenommen mit dem I.G.-Klopffmeßgerät bei verschiedenen Verdichtungen  
1: = 4,2; 2: = 4,4; 3: = 4,8
- Abb. 24. Schaltung des I.G.-Klopffmeßgeräts mit Thermo-Uniformer
- Abb. 25. Schaltung des I.G.-Klopffmeßgeräts mit RC-Glied  
1 Eingang 4 Ausgang Instrument  
2 Erde 5 Instrument  
3 Ausgang
- Abb. 26. Eichkurven für den I.G.-Prüfmotor  
— aufgenommen mit Springstab-Indikator  
— aufgenommen mit Quarzdose
- Abb. 27. Elektrische Schaltung, Verstärkung und Aufnahme bei Verwendung des Indikators nach Abb. 9 und 10 als Klopffmeßgerät  
1 Membran 6 Widerstand  
2 Verstärker 7 Drossel  
3 Braunsch'sches Rohr 8 Strommesser  
4 Filmkamera 9 Kondensator  
5 Batterie 10 Widerstand
- Abb. 28. Aufzeichnungen des induktiven Klopffmeßgeräts nach Abb. 27 bei verschiedenen Verdichtungen  
a) Klopffbeginn nach Gehör = 6,62  
b) = 5,7 (Oktan G4) im CFR-Motor
- Abb. 29. Messung des absoluten Klopffbeginnes im CFR-Motor  
Kraftstoff CZ 87, Drehzahl 600 U/min, Luftüberschußzahl 0,9, Verdichtungsverhältnis 6,5 : 1
- Abb. 30. Schema einer elektrischen Differentiationseinrichtung  
1 Meßimpuls  $\frac{dp}{dt}$  2 Ausgangs-Spannung entspricht  $\frac{d^2p}{dt^2}$   
2 Heizung
- Abb. 31. Meßstreifen mit selbsttätiger Aufzeichnung der Druckbeschleunigung  
1 Nr. der Messung 2 Ladedruck in mmHg  
3 Klopffbeginn
- Abb. 32. Amplitudenverhältnisse der einzelnen Druckfunktionen bei verschiedenen Überladungen (Augenblickswerte)  
CFR-Motor; Prüfkraftstoff: Fliegerbenzin

- Abb. 33. Schema eines Temperatur-Meßstopfens  
1 Zum Spiegel-Galvanometer
- Abb. 34. Temperatur-Meßstopfen für Zündkerzenbohrung
- Abb. 35. Oktanzahlbestimmung durch Eingabelung des  
zu untersuchenden Kraftstoffes  
1 Verdichtungsverhältnis  
2 Temperatur (Verleichszahl)  
OZ = Oktanzahl
- Abb. 36. Abnahmedose am Zylinderkopf eines luftge-  
kühlten Flugmotors
- Abb. 37. Gesamtschwingungs- und Teilfrequenz-Oszillogramme,  
abgenommen am Zylinderkopf eines klopfenden  
CFR-Motors  
1 Zündpunkt
- Abb. 38. Gegenüberstellung der Gesamtschwingung und ein-  
zelner Teilfrequenzen eines klopfreien und  
eines klopfenden CFR-Motors  
1 Zündpunkt
- Abb. 39. Betriebsdämpfungen des Oktavsiebes für 2 x 8  
Oktaven von Siemens & Halske
- Abb. 40. Schwingungs-Aufnahmen der Schwingungen eines  
gekapselten Einzylindermotors, am Lagerschild  
abgetastet
- Abb. 41. Akustische Aufnahmeapparatur für Versuche an  
Fahrzeugen
- Abb. 42. Schema einer akustischen Aufnahmedose  
1 Quarzgeber in Hülse vorgespannt  
2 Masse  
3 Stützmembran
- Abb. 43. Klopfbilder an Einzylindermotor bei verschie-  
denen Verdichtungen
- Abb. 44. Klopfkurven verschiedener Benzine  
1 OZ 60  
2 Rumänisches Erdöl-Benzin  
3 OZ 70
- Abb. 45. Während der Fahrt aufgenommene Geräuschbilder  
eines Vierzylindermotors  
1 40 km/h, 1/4 Gas  
2 50 km/h, 1/2 Gas  
3 60 km/h, 1/1 Gas  
Vorzündung 50



Abb. 46. Klopfbilder vom Einzylinder-Flugprüfmotor

Abb. 47. Kapazitative Beschleunigungsaufnahmedose

- 1 Membran
- 2 Masse
- 3 Isolierung
- 4 Elektrode
- 5 Massenelektrode
- 6 Bodenstück des Gehäuses
- 7 Oberteil des Gehäuses

Abb. 7 Рис. 7

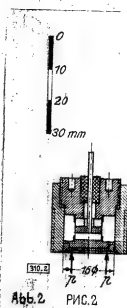
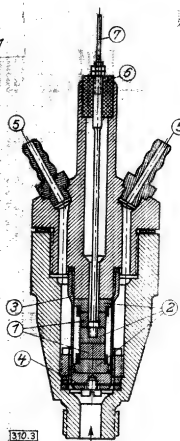


Abb. 2      Рис. 2



Абб.3 РИС.3

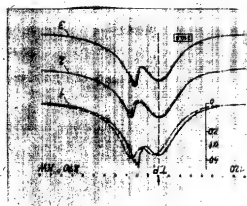


Abb. 6  
Pnc. 6

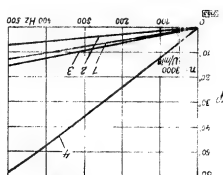
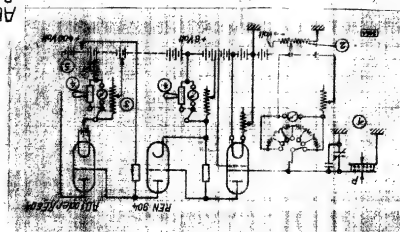
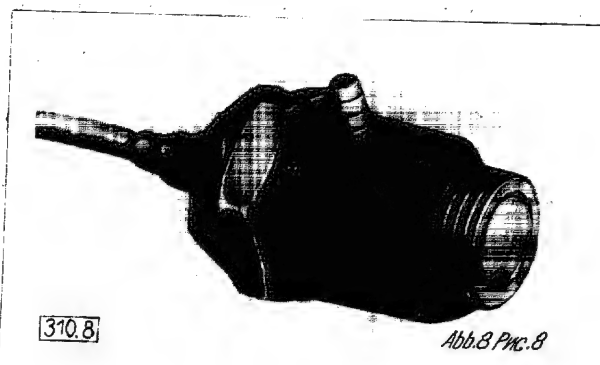
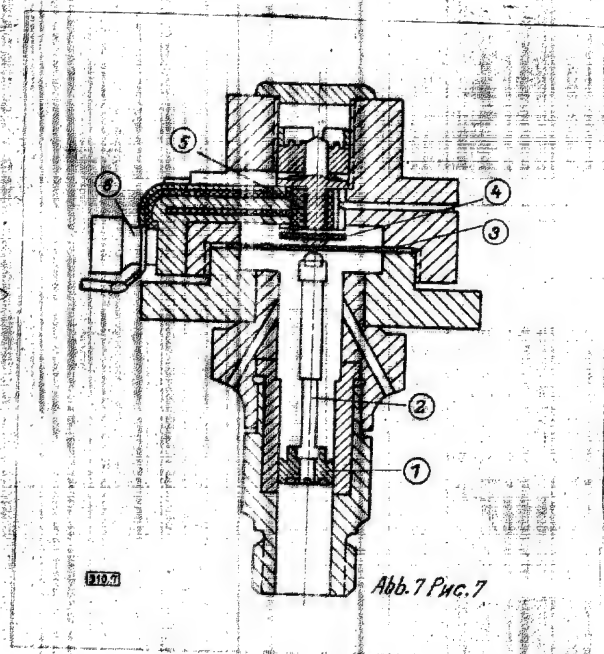
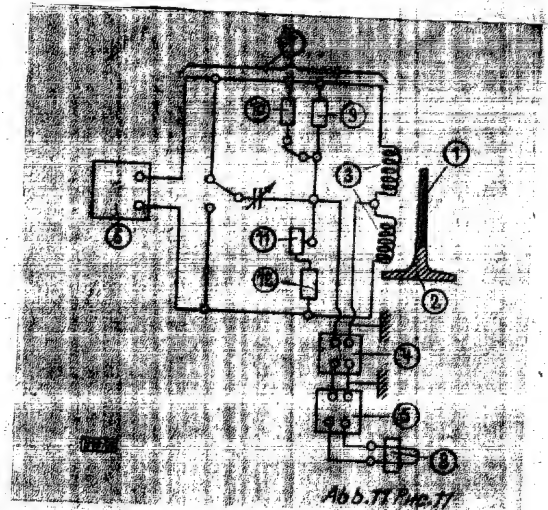
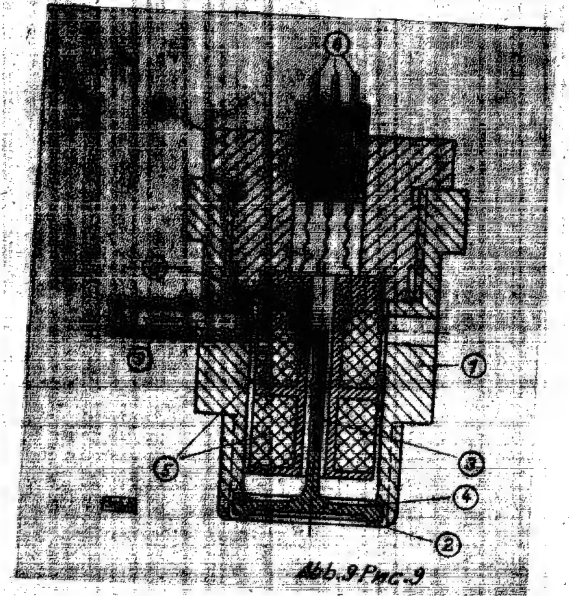
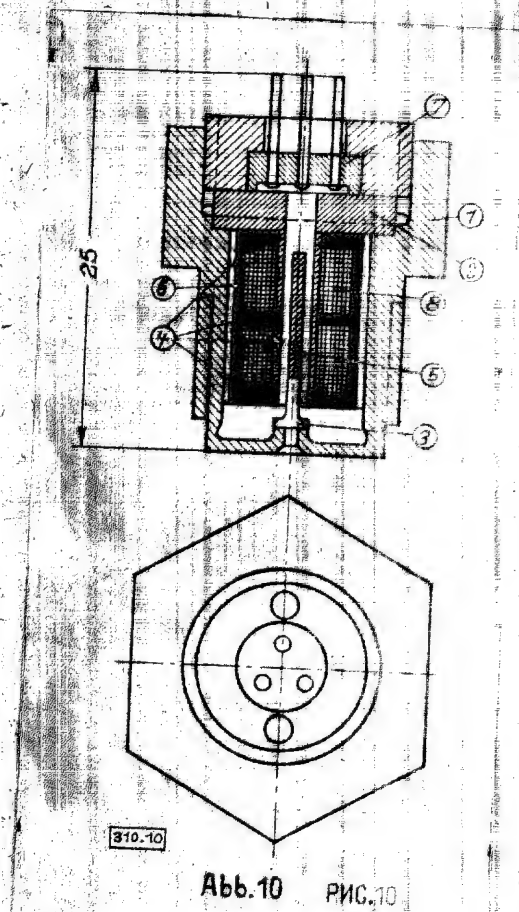
Abb. 5  
Pmc. 5

Abb. 4  
Pmc. 4





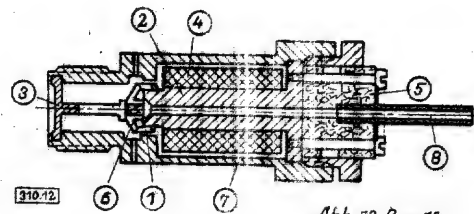


Abb. 12 Рис. 12

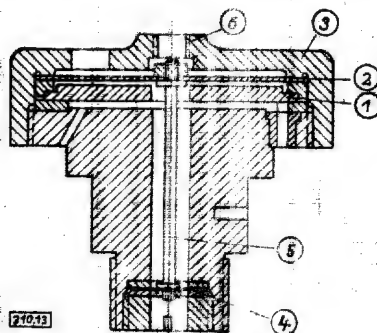


Abb. 13 Рис. 13

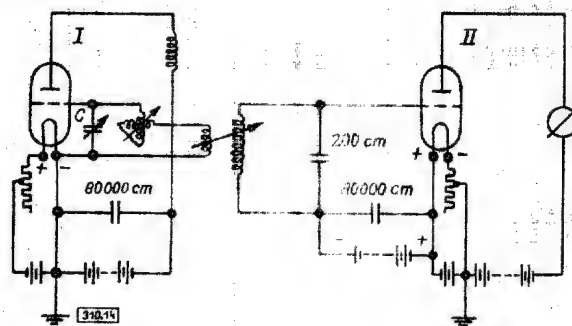
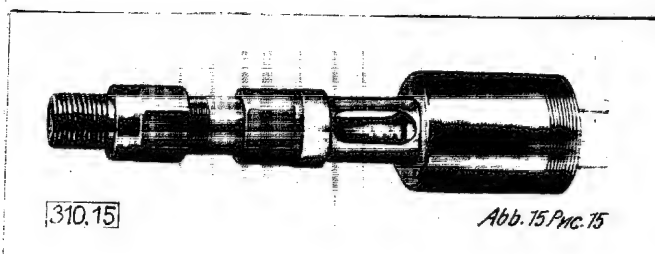


Abb. 14 Рис. 14





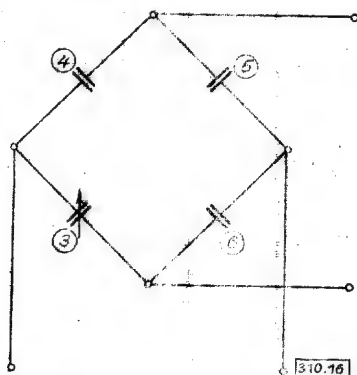


Abb. 6

Рис. 16

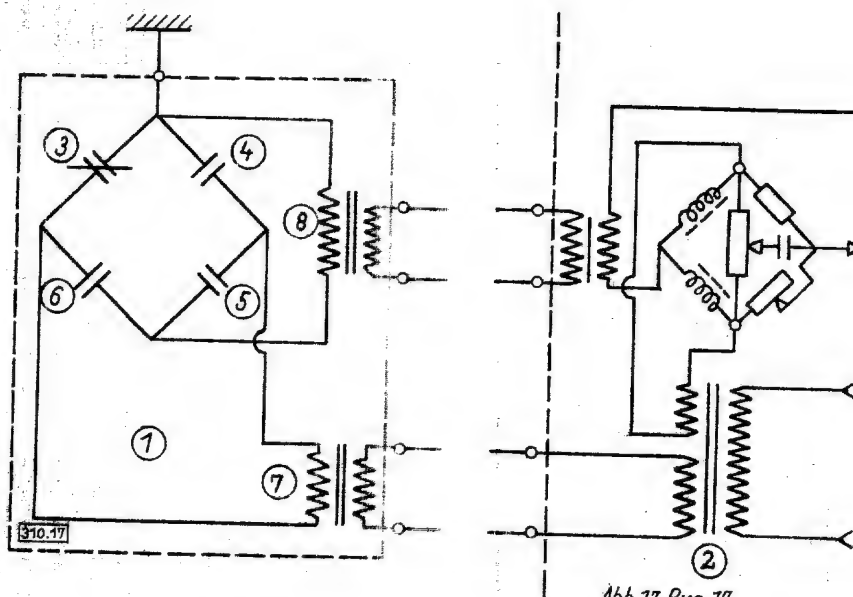
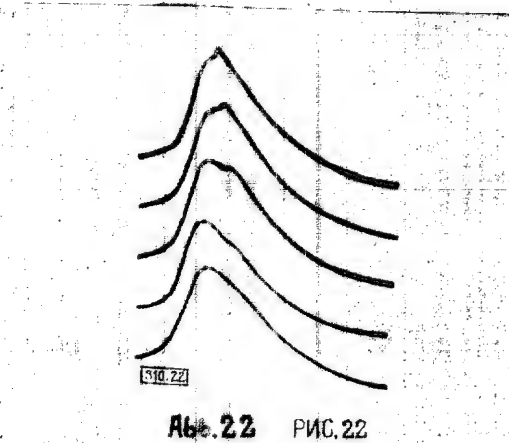
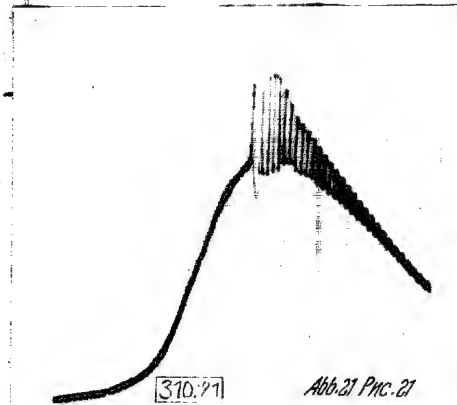
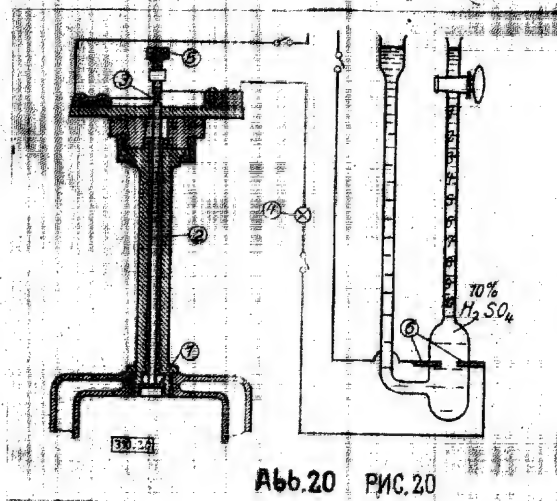
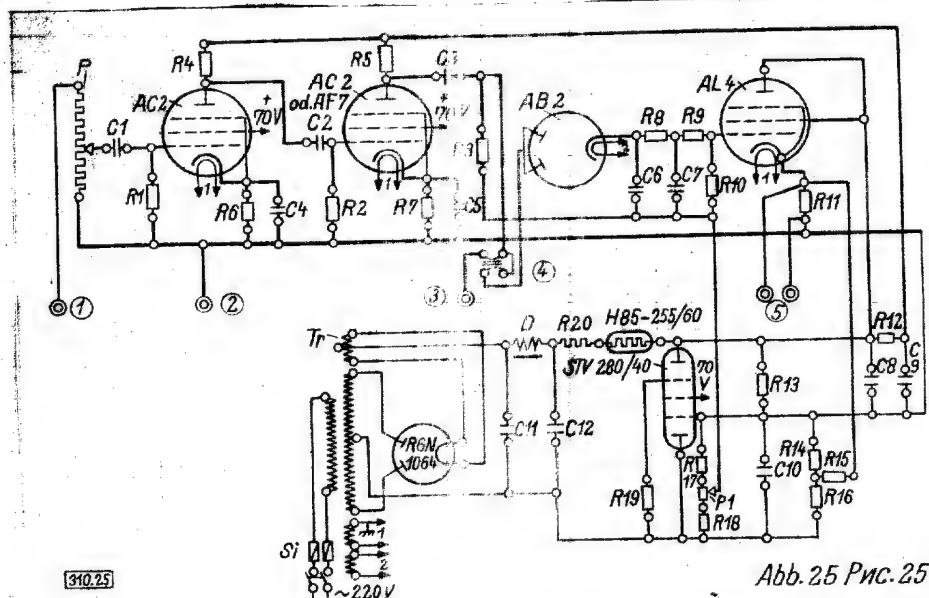
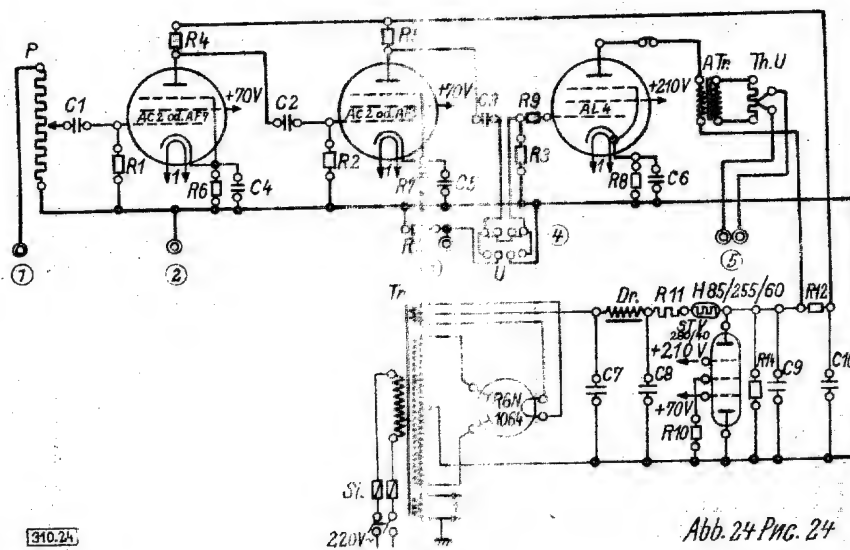
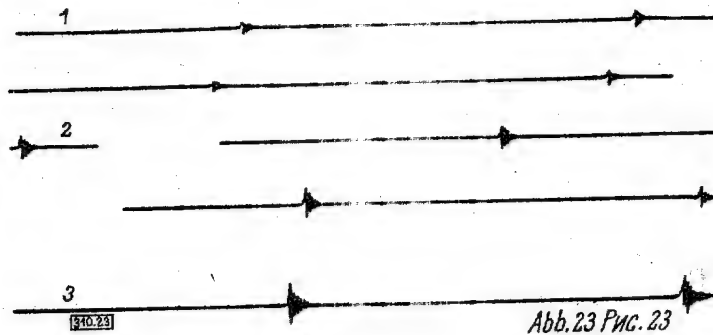
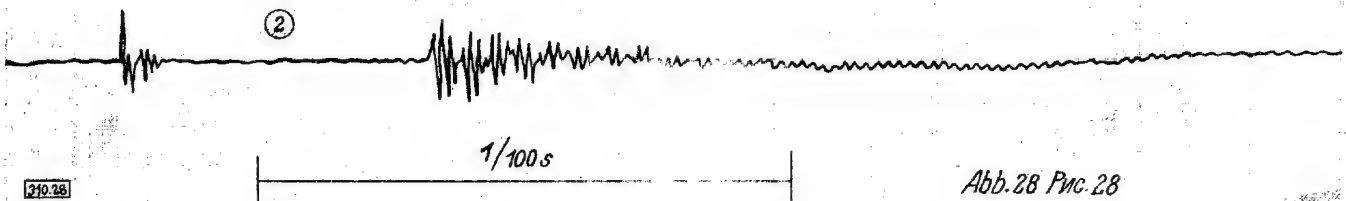
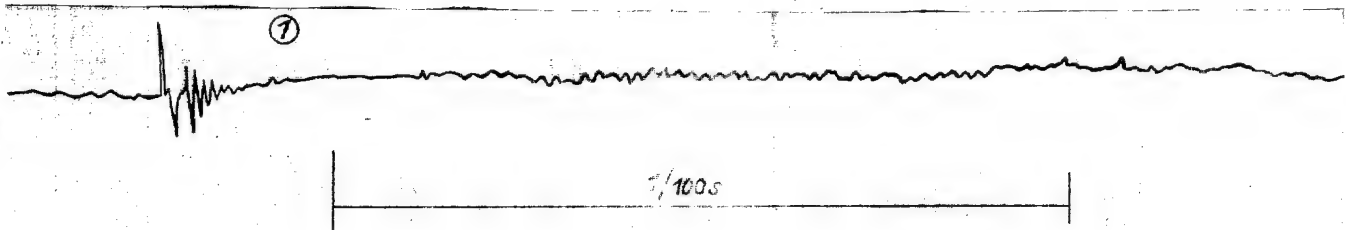
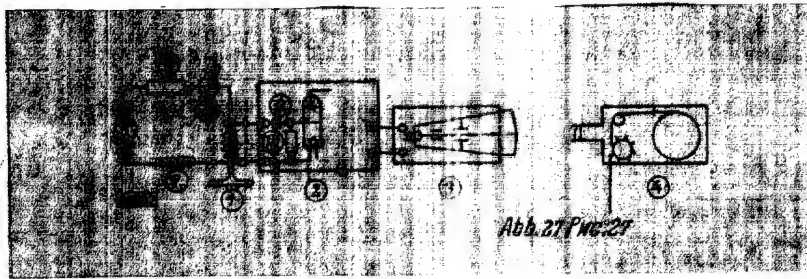
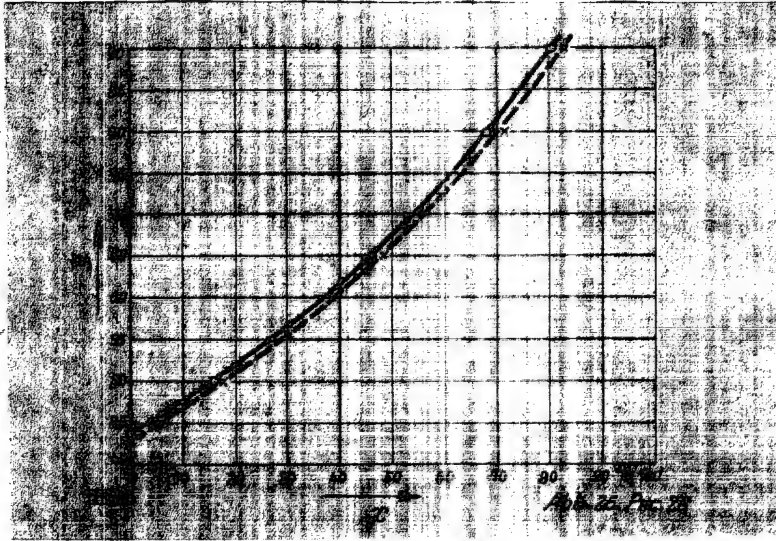


Abb. 17 Рис. 17







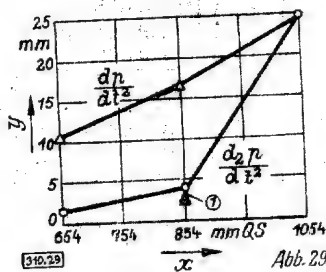
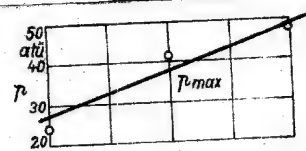


Abb. 29 Pnc. 29

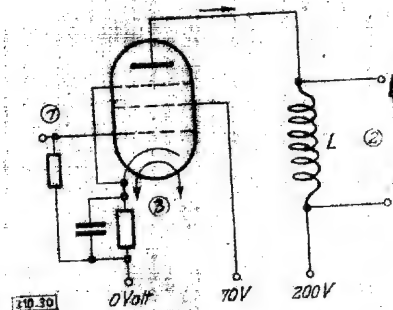


Abb. 30 Pnc. 30

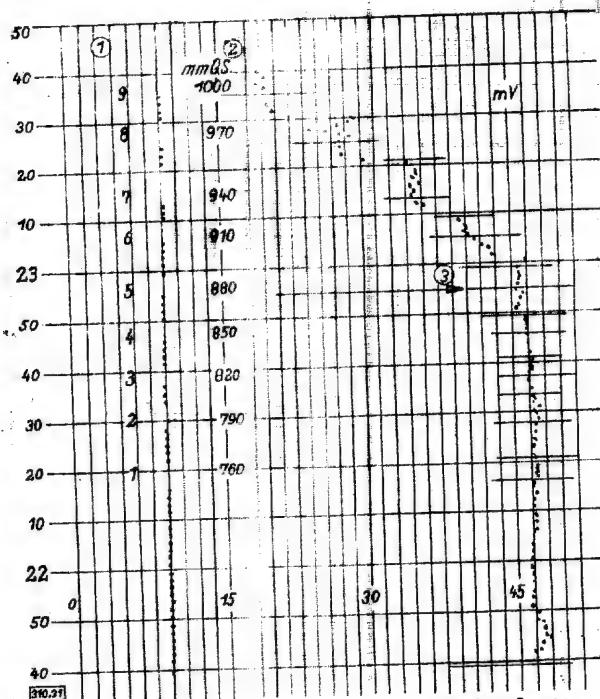
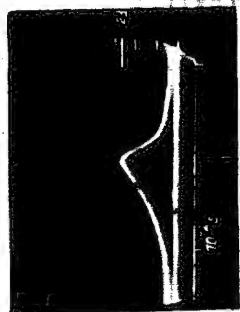
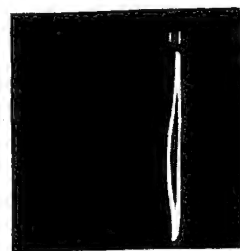


Abb. 31 Pnc. 31

Verdichtung sichtbar

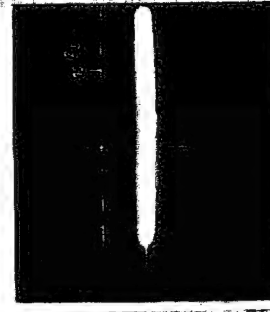
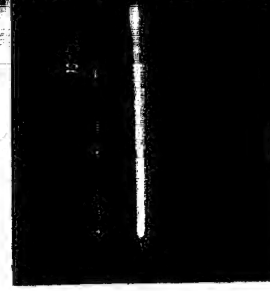
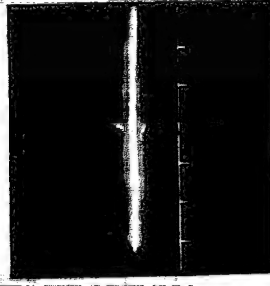
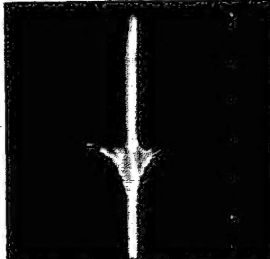
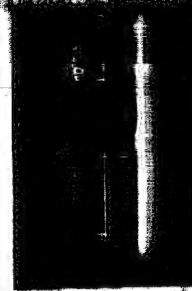
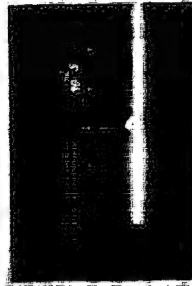
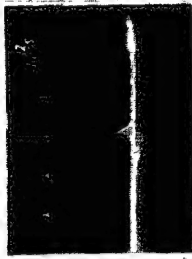
P



← Zeit verläuft

at

$\times 10^{-4} \text{ at/s at/сек}$   
 $\times 10^{-7} \text{ at/s}^2 \text{ at/сек}^2$



+300 mm Hg  
mm p.c.

+150

±0

-100

Abs. 34 P.V.C. 32

$\tau_0 = 0.05 \text{ min. 00/min.}$   
 $\varepsilon = 0.5:1$   
 $\lambda = 0.9$   
 $t_0 = 80^\circ \text{C}$

$\frac{d\tau}{dt}$

$\frac{d^2\tau}{dt^2}$

310.32



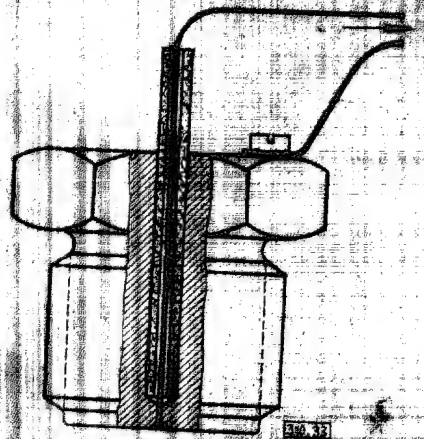


Abb. 33 Рис. 33

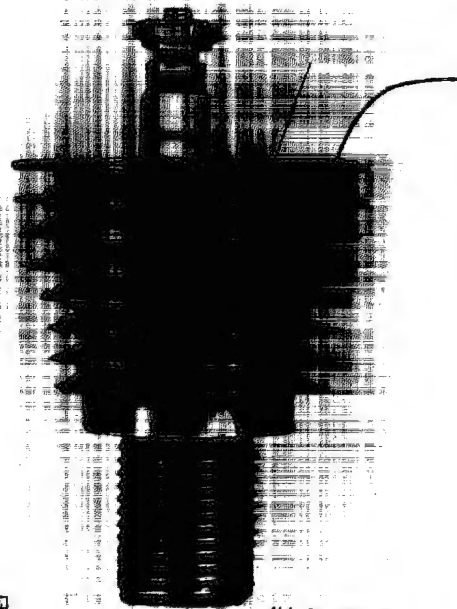
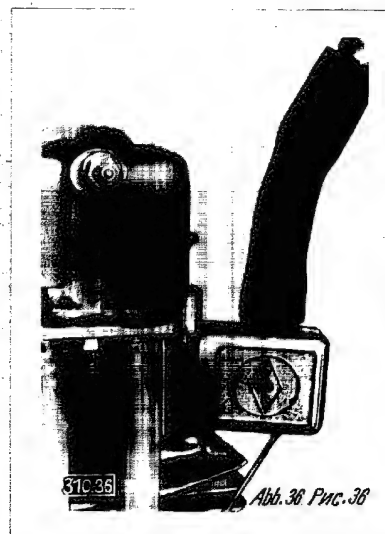
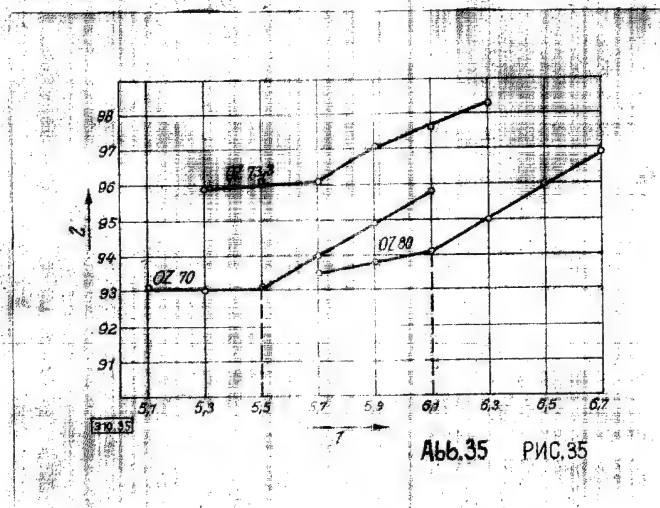


Abb. 34 Рис. 34



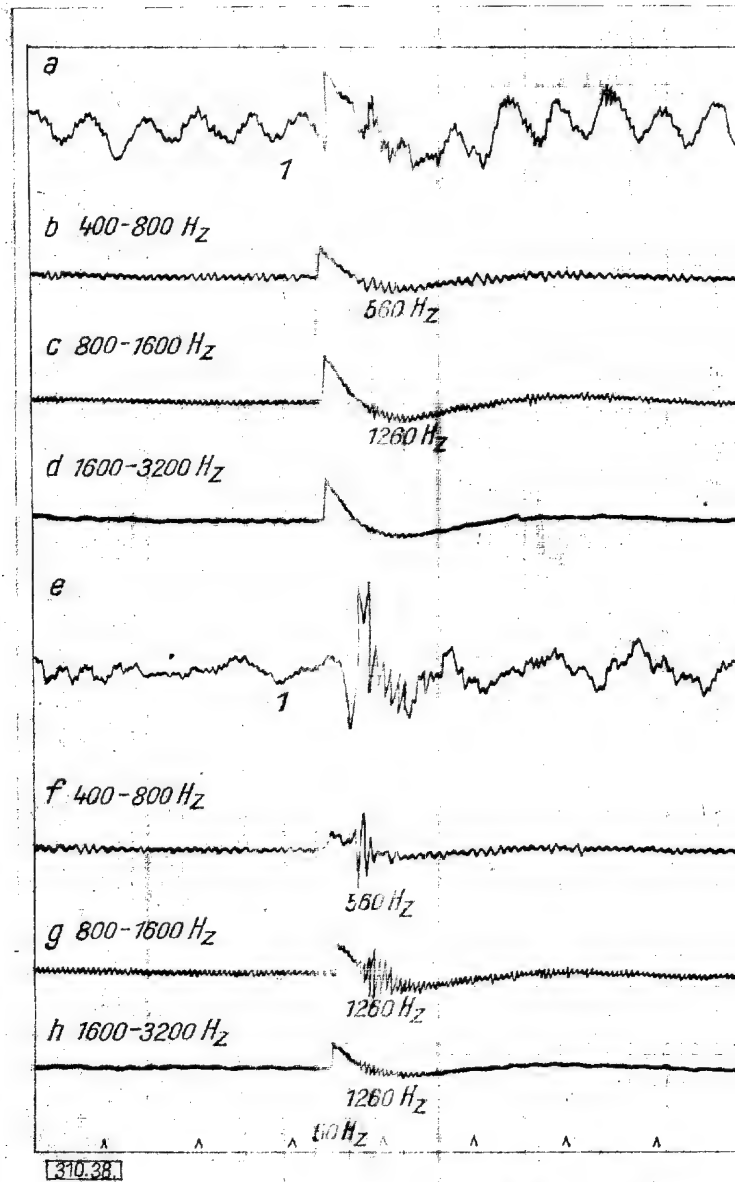
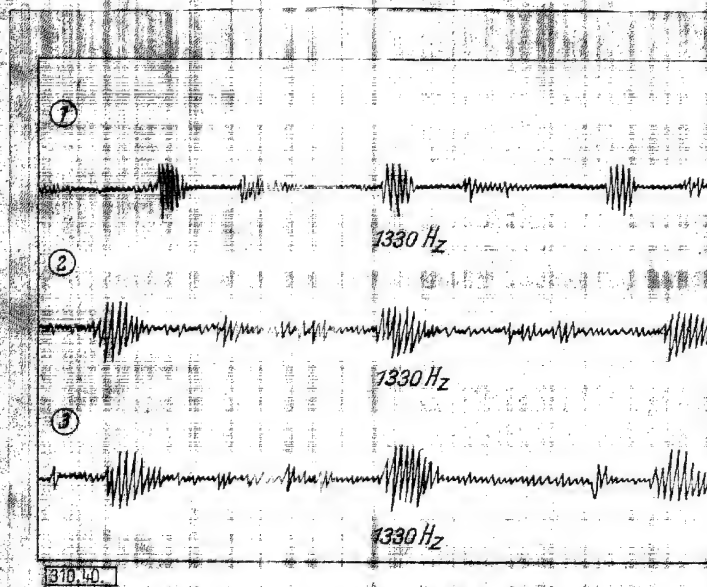
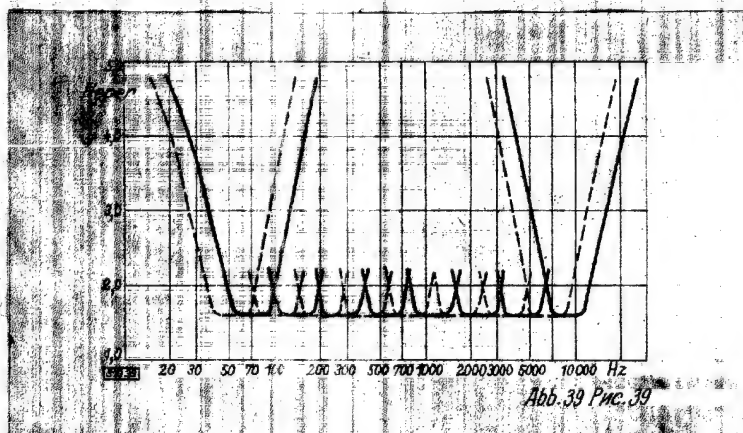
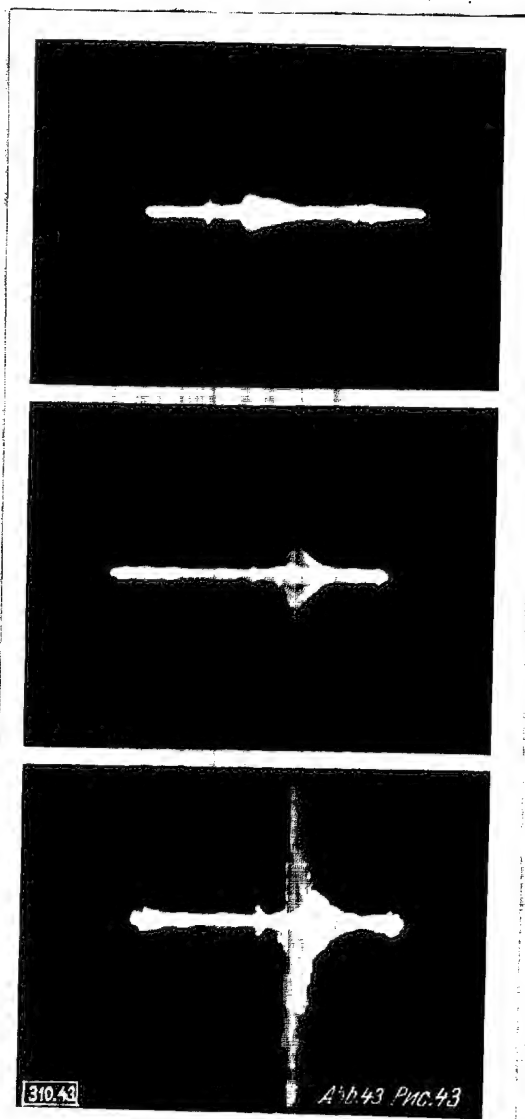


Abb.38 PNC.38





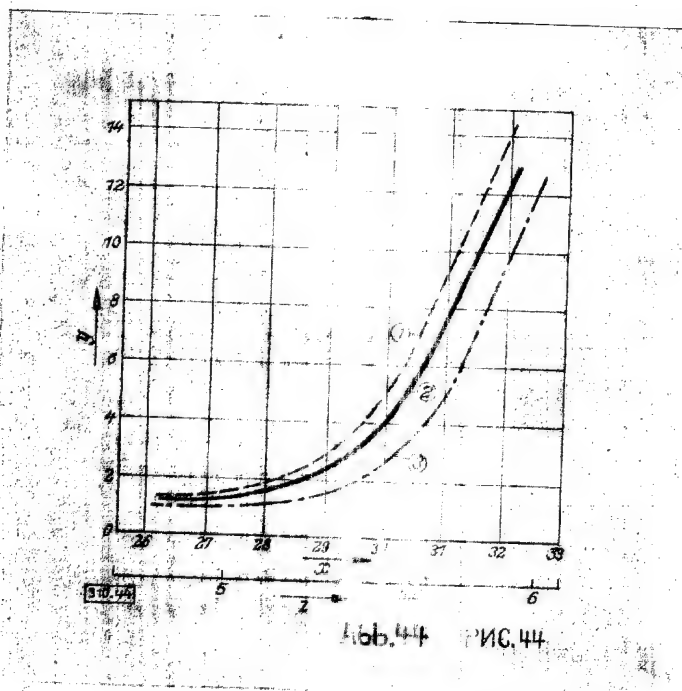
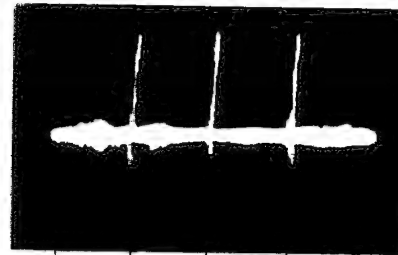
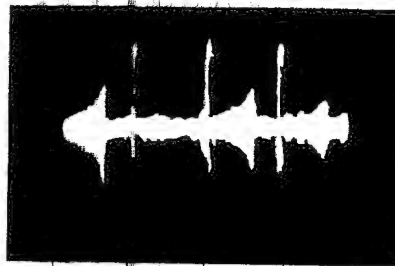


рис. 44





Zyl. 4 3 1 2

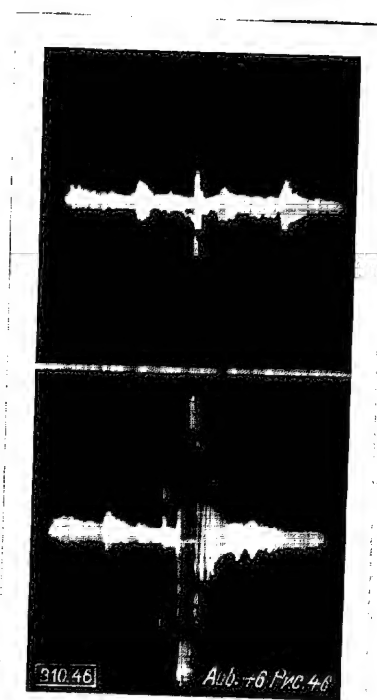


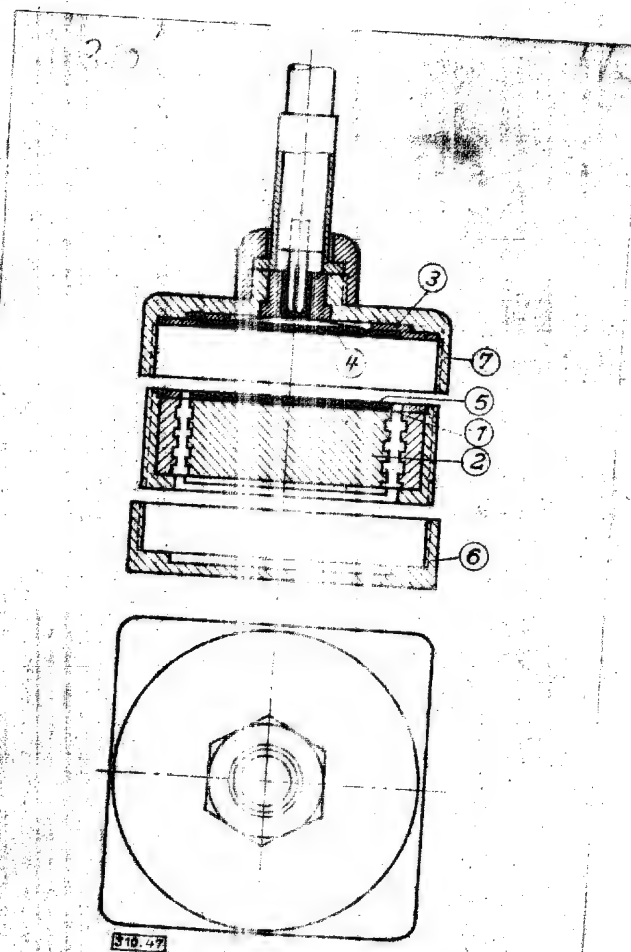
Zyl. 3 1 2 4



310.45

Abb. 45. Pnc. 45





310.47

Abb 47

Рис. 47

- 2 -

### Stellungnahme des Berichtsbetreuers

zum Bericht Nr. 225,

themat. Kennziffer ID/20

#### Klopffestigkeit und Zündwilligkeit (anerkannte Ergebnisse und ungelöste Aufgaben der Forschung)

Verfasser: Ing. Dr. techn. Dr. jur. B. Riediger  
Berichtsbetreuer: Prof. Dr.-Ing. R. Drawe

Der Bericht gibt anhand des vorliegenden Schrifttums eine Darstellung der Forschungstätigkeit und der dabei gewonnenen Erkenntnisse über die Klopffestigkeit und die Zündwilligkeit. Der Bericht gewinnt an Wert durch die Stellungnahme des Verfassers zu den im Schrifttum niedergelegten Auffassungen; er betont mit Recht die Notwendigkeit weiterer Forschungsarbeit.

Ich bin der gleichen Ansicht; mir erscheint sicher, daß, vor allem bei Ottomotoren, das Bestreben herrschen wird, die Literleistung zu erhöhen, um geringere Leistungsgewichte zu bekommen. Das gegebene Mittel dazu ist die Erhöhung des Verdichtungsgrades. Bei Flüssiggas und Methan als Treibstoffen ist das ohne weiteres möglich, weil diese Kraftstoffe ausreichend klopffest sind. Die beim Betrieb mit ihnen erreichten Vorteile: geringerer Brennstoffverbrauch, besonders bei den Fahrleistungen, und geringeres Leistungsgewicht, wird man dann auch beim Betrieb mit flüssigen Kraftstoffen anstreben; dazu ist aber erforderlich, das Auftreten von Klopferscheinungen zu verhindern.

- 3 -

Inhalt s a n g a b e

zum Bericht Nr. 225,

them. Kennziffer ID/20

**Klopffestigkeit und Zündwilligkeit (anerkannte Ergebnisse  
 =====  
 und ungelöste Aufgaben der Forschung)  
 =====**

Verfasser: Ing. Dr. techn. Dr. jur. B. Riediger

Die Klopffestigkeit der Ottokraftstoffe und die Zündwilligkeit der Diesekraftstoffe sind Eigenschaften, die an Bedeutung alle anderen überragen. Die Forschung bemühte sich schon frühzeitig, die Ursachen für das Klopfen von Ottomotoren festzustellen. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Kenntnis der Einzelheiten des Klopfvorganges. Um diese zu vertiefen, werden Aufzeichnungen des Druckverlaufes, seiner Änderungsgeschwindigkeit und -beschleunigung, analytische Untersuchungen der Umsetzungsprodukte in einzelnen Phasen des Verbrennungsvorganges sowie spektroskopische Beobachtungen benutzt. Ähnlich liegen die Aufgaben bei der Erforschung des Verbrennungsvorganges im Dieselmotor. Bei diesen wird jedoch der Gesamt Ablauf außer durch den in erster Linie von chemischen Eigenschaften des Kraftstoffes abhängigen Zündverzug auch durch die Art der mechanischen Aufbereitung des Gemisches wesentlich beeinflusst; hierbei spielen die Strömungsgeschwindigkeiten, der Grad der Durchwirbelung und ähnliche physikalische Vorgänge eine wesentliche Rolle.

Es hat sich gezeigt, daß eindeutige Zusammenhänge zwischen der Klopffestigkeit oder der Zündwilligkeit und dem chemischen Aufbau der als Kraftstoffe verwendeten Kohlenwasserstoffe sowie einigen Abkömmlingen dieser Verbindungen bestehen. Daher ist es für jeden, der sich mit diesen Fragen näher befaßt, zweckmäßig, über die wichtigsten Forschungsergebnisse, welche die Strukturchemie, die Reaktionskinetik und die che-

- 4 -

nische Thermodynamik bieten, unterrichtet zu sein.

Nachdem die aus den Notwendigkeiten der Praxis geborenen motorischen Prüfverfahren sowohl für Otto- als auch für Dieselmotoren vereinheitlicht sind und die erzielte Messgenauigkeit eine beachtliche Höhe erreicht hat, erscheint es zweckmäßig, den Schwerpunkt der Forschung in eine weitere Aufhellung der theoretischen Zusammenhänge zu verlegen. Daneben bleibt für die Praxis das Ziel, die jetzt übliche Bewertung der Kraftstoffe durch Oktan- oder Zetanzahl so zu erweitern, daß ihr Verhalten in Bezug auf Klopfestigkeit oder Zündwilligkeit auch bei Änderung von Betriebskenngrößen erfasst wird. Ein solcher Vorschlag liegt in dem Überladeverfahren der DVL für sehr klopfeste Fliegerkraftstoffe vor. Desgleichen erscheint es erstrebenswert, die Zusammenhänge zwischen der Klopfestigkeit oder der Zündwilligkeit und der Eignung der Kraftstoffe für die weitergehenden Beanspruchungen des Fahrbetriebes zu ermitteln, eine Aufgabe, die sicherlich nur durch eine Mehrpunktbewertung in sinnvoller Anwendung des DVL-Verfahrens erreicht werden kann.

Neben den motorischen Prüfverfahren gibt es eine Anzahl von Bewertungsverfahren, mit Hilfe chemisch-physikalischer Kenngrößen die Klopfestigkeit oder die Zündwilligkeit zu bestimmen. Ihre Zuverlässigkeit ist gewöhnlich bei Kraftstoffen, deren Zusammensetzung Besonderheiten aufweist, gering, also nicht unter allen Umständen verbürgt. Trotzdem hat sich z.B. die Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselmotoren aus der Dichte und der Siedekennzahl im allgemeinen bewährt. Es ist damit zu rechnen, daß bei einer Erweiterung der Kenntnis der chemisch-physikalischen Gesetze des Verbrennungsablaufs im Motor auch auf diesem Gebiete Fortschritte erzielt werden, welche die motorische Prüfung wenigstens in geringem Umfang entbehrlich machen können.



- 5 -

# **Inhaltsverzeichnis**

	<u>Seite</u>
<b>I. Gesicherte Erkenntnisse über Klopfestigkeit und Zündwilligkeit von Moterkraftstoffen . . . . .</b>	<b>7</b>
1. Die Anfänge der Klopfwert- und Zündwilligkeitsprüfung bei Otto- und bei Dieselmotoren . . . . .	7
2. Einzelheiten des Klopfvorganges beim Ottomotor	10
a. Verlauf der klopfenden Verbrennung . . . . .	10
b. Analytische und spektroskopische Untersuchungen des Klopfens . . . . .	13
c. Auswirkung des Klopfens auf die Temperatur der Zylinderwände und des Kolbens, den Wärmeübergang und die Motorleistung . . . . .	15
d. Einfluss verschiedener Betriebsbedingungen . . . . .	17
3. Einzelheiten des Betriebes mit zündträgen Kraftstoffen beim Dieselmotor . . . . .	19
a. Wirkung des Zündverzuges auf den Gang des Motors . . . . .	20
b. Einfluss verschiedener Betriebsbedingungen . . . . .	23
4. Das gegensätzliche Verhalten klopfreudiger und zündwilliger Kraftstoffe . . . . .	25
a. Die Hauptgruppen der Kohlenwasserstoffe . . . . .	27
b. Das Reaktionsverhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen und ihr Vorkommen in den Kraftstoffen . . . . .	33
c. Die Bedeutung sauerstoffhaltiger Kohlenwasserstoffadditive . . . . .	48
5. Gegenklopfmittel und Zündbeschleuniger . . . . .	52
<b>II. Beitrag zur Klärung offener Fragen in den letzten Jahren . . . . .</b>	<b>59</b>
1. Die Klopfwert- und Zündwilligkeitsermittlung mit Hilfe von Prüfmotoren . . . . .	59
a. Die Gemeinschaftsarbeit an der Klopfwertmessung von Ottokraftstoffen unter Führung des Oppauer Prüfstandes der I.G.-Farbenindustrie AG. . . . .	64
b. Das Überlade-Prüfverfahren der ehemaligen Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (Mehrpunktbewertung) . . . . .	70

- 6 -

	<u>Seite</u>
c. Das Zündvermögeverfahren mit verschiedenen Prüfdieselmotoren . . . . .	71
d. Das Anlaufverfahren des ehemaligen Heereswaffenamtes . . . . .	77
2. Versuche der rechnerischen Ermittlung von Klopfwert und Zündwilligkeit aus chemischen und physikalischen Kenngrößen . . . . .	80
a. Verwertung der Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Kenngrößen und der Zündwilligkeit von Dieselmotoren . . . . .	81
b. Verwertung der Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Kenngrößen und der Klopfintensität von Ottomotoren . . . . .	84
3. Von den üblichen Wegen abweichende Forschungsrichtungen . . . . .	86
III. Schlußwort . . . . .	92
IV. Schrifttum . . . . .	93
V. Verzeichnis der Abbildungen und ihrer Unterschriften . . . . .	102
VI. Verzeichnis der Zehntafeln . . . . .	109

- - - - -

- 7 -

# **I. Gesicherte Erkenntnisse über Klopfestigkeit und Zündwilligkeit von Motorkraftstoffen**

## **1. Die Anfänge der Klopfwert- und Zündwilligkeitsprüfung bei Otto- und bei Dieselmotoren**

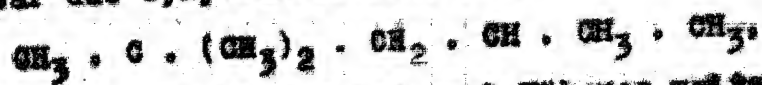
Das Klopfen, das bei hochbelasteten und mit ungeeignetem Kraftstoff betriebenen Verbrennungsmotoren beobachtet wird, ist eine schon lange bekannte Erscheinung. Sie ist besonders von den Kraftfahrern gefürchtet und macht sich durch einen empfindlichen Leistungsabfall und ein Geräusch bemerkbar, das dieser Erscheinung den Namen gegeben hat. Es tritt sowohl bei Otto- als auch bei Dieselmotoren auf; doch soll gleich einleitend betont werden, daß diese beiden Fälle trotz ihrer äußeren Ähnlichkeit einer getrennten Betrachtung bedürfen. Es sind die Verschiedenheiten zwischen den zum Klopfen neigenden Kraftstoffen beim Ottomotor und beim Dieselmotor so groß, ihre Verbrennungseigenschaften von so entgegengesetzter Art, daß es das Verständnis nur erschwert, wenn die Unterschiede nicht von vornherein beachtet werden. Daher sollen die Bezeichnung "Klopfen" und die damit zusammenhängenden Begriffe wie Klopfestigkeit (nämlich der Kraftstoffe), Gegenklopfmittel und Ähnliches nur für den Bereich des Ottomotors angewendet werden. Was beim Dieselmotor zu einem dem Klopfen des Ottomotors ähnlichen Verhalten führt, wird vornehmlich durch mangelnde Zündwilligkeit - zu großem Zündverzug - der verwendeten Kraftstoffe verursacht. Deshalb hat es sich seit langem eingebürgert, diesen Begriff bei der Betrachtung der Vorgänge im Dieselmotor in den Vordergrund zu stellen. Durch die Wahl der Ausdrücke ergibt sich somit eine klare Trennung zwischen den beiden Fällen.

Das Klopfen von Ottomotoren in der heute geläufigen Bedeutung wurde als einheitlich zu beurteilende Erscheinung im Verlaufe des ersten Weltkrieges erkannt, als durch die sprunghafte Entwicklung unter dem Druck der Kriegsführung der Moto-

- 8 -

rennen, insbesondere für Fahr- und Flugzeuge, eine bis dahin unbekannte Höhe erreichte. Es war Harry R. Ricardo, der unmittelbar nach Beendigung dieses Krieges an eine systematische Erforschung des Vorganges heranging und klar erkannte, daß das Klopfen vornehmlich von der Form des Verbrennungsraumes, der Höhe des Verdichtungsverhältnisses, ganz besonders aber von der Art des verwendeten Kraftstoffes abhängt [1].<sup>1)</sup>

Ricardo verwendete auch als erster für die Untersuchung verschiedener Kraftstoffe einen wassergekühlten Einzylinder-Viertaktmotor mit etwa 2,1 l Hubraum als Prüfmotor und änderte während des Laufes das Verdichtungsverhältnis in den Grenzen zwischen 1 : 3,7 und 1 : 8. Er bewertete die untersuchten Kraftstoffe nach dem höchsten nutzbaren Verdichtungsverhältnis (highest useful compression ratio, HUCR), dem Wert, bis zu dem das Verdichtungsverhältnis gesteigert werden kann, ohne daß sich Klopfen einstellt. Damit war ein Maß gewonnen, das bei Wiederholung der Versuche nur wenig streute und sich für Vergleichsmessungen eignete. Die wesentlichen Gedanken der von Ricardo vorgeschlagenen und durchgeführten motorischen Klopfwertprüfung hat man bis heute beibehalten können. Allerdings wird nicht mehr das höchste nutzbare Verdichtungsverhältnis zur Kennzeichnung der Kraftstoffe benutzt, sondern die Oktanzahl, die auf das als Standard-Kraftstoff verwendete i-Oktan und zwar das 2,2,4-Trimethylpentan



benutzt. Hierüber folgt noch Näheres weiter unten.

Ricardo hat ursprünglich das Verhalten der untersuchten Kraftstoffe mit einem Gemisch verglichen, das er aus einem klopfirrenden, von Aromaten befreiten Benzol und aus Toluol (Methylbenzol)  $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$  herstellte. Er bezeichnete dann als Toluolzahl den in Prozenten ausgedrückten Volumenanteil des Toluols in einem solchen Gemisch, das dasselbe höchste nutzbare Verdichtungsverhältnis erlief, wie der untersuchte Kraftstoff.

<sup>1)</sup> Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Schrifttum am Ende der Arbeit.



- 9 -

Auch beim Dieselmotor war es vornehmlich der Fahrzeugmotor mit seinen hochentwickelten Bauformen, der dazu drängte, die dem Klopfen des Ottomotors ähnlichen Erscheinungen zu klären. Da jedoch die Verwendung von Dieselmotoren für Fahrzeuge jüngerer Datums ist, wurde mit einer systematischen Untersuchung erst viel später begonnen. Anfang der 30er Jahre unseres Jahrhunderts waren es zunächst die Arbeiten von P. Dumanois [2] sowie von G. D. Boerlage und J. J. Broeze [3], welche es unternahmen, in Motoren für Klopfwertprüfung die Eignung von Dieselmotorkraftstoffen zu untersuchen. Es kommt dabei, wie schon erwähnt, vor allem auf die Zündwilligkeit an. Auf Vorschlag der beiden zuletzt genannten Forscher wurde auf der Welt-Erdöltagung 1933 zunächst die Zetanzahl als international anerkannter Maßstab für die Zündwilligkeit von Dieselmotorkraftstoffen angenommen. Sie drückte - ähnlich wie die Oktanzahl - wie später noch ausführlicher zu erörtern sein wird, - den Raumannteil eines Vergleichskraftstoffes an dem sehr zündwilligen Zetan, einem einfach ungesättigten Kettenkohlenwasserstoff, aus. Sie wird jedoch wegen der Unbeständigkeit des Zetans heute durch die auf Zetan (dem entsprechenden gesättigten Kohlenwasserstoff) bezogene Zetanzahl ersetzt.

Auf dem Gebiet der Prüfung der Dieselmotorkraftstoffe war bis vor kurzem noch keine so weitgehende Vereinheitlichung wie bei Ottomotorkraftstoffen erzielt, obwohl über die chemisch-physikalischen Zusammenhänge im Fall des Dieselmotors größere Klarheit besteht als beim Ottomotor. Dabei spielt offensichtlich die Tatsache eine Rolle, daß beim "Klopfen" des Dieselmotors die Zündwilligkeit alle anderen Einflüsse bei weitem übertrifft. Es ist daher auch noch mit von einander abweichenden Verfahren eine im allgemeinen besser übereinstimmende Bewertung der Dieselmotorkraftstoffe zu erzielen; bei den verwickelten Zusammenhängen, die das Klopfen des Ottomotors verursachen, muß hingegen die genaue Übereinstimmung aller Versuchsbedingungen peinlich beachtet werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

## 2. Einzelheiten des Klopfvorganges beim Ottomotor

### a. Verlauf der klopfenden Verbrennung

Das wesentliche Merkmal der klopfenden Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches ist die Tatsache, daß sich die Flammenfront von der Zündstelle aus nicht gleichmäßig fortbewegt, sondern daß vor Erreichung der äußersten Punkte des Verbrennungsraumes der Rest der Ladung mit einer wesentlich höheren Geschwindigkeit verbrannt, als dies unter normalen Verhältnissen bei dem gegebenen Kraftstoff-Luft-Gemisch der Fall ist [4]. Das Klopfen wird von Temperatur- und Druckänderungen begleitet, welche von dem angestrebten Verlauf abweichen und sich auf den Betrieb des Motors ungünstig auswirken. Als kennzeichnend für den Unterschied zwischen klopfender und nicht klopfender Verbrennung sei Abb. 1 a und b nach H. Nielsen [5] wiedergegeben. Es zeigt den Verlauf des Druckes über der Zeit und gleichzeitig aufgezeichnete Schwingungen der Gasmasse im Verbrennungsraum. Wie daraus zu ersehen ist, erreicht die Druckspitze nicht nur wesentlich höhere Werte als bei nicht klopfendem Betrieb, sondern noch entscheidender ist der durch die Tangente, mathematisch durch den Differentialquotienten erfasste Druckanstieg, der erhebliche mechanische Beanspruchungen des Triebwerkes zur Folge hat. Auf eine ausführliche Wiedergabe aller diesbezüglichen Untersuchungen und Messungen kann hier unter Hinweis auf Kapitel 12 des Buches von H. Jost [6] verzichtet werden, weil sich dort eine eingehende Darstellung der vom 1939 durchgeführten Arbeiten findet.

Ohne schon hier auf die noch ungeklärten Fragen bei der Beurteilung der Ursachen des Klopfens einzugehen, sollen Ergebnisse einer Arbeit kurz erwähnt werden, die wohl 1938 veröffentlicht, von Jost aber nicht mehr näher berücksichtigt wurde. Ein nicht unerheblicher Teil der Forscher vertritt nämlich die Ansicht, daß Untersuchungen an Motor wenig geeignet sind, wesentlich zur Klärung des Klopfvorganges selbst beizutragen.



- 11 -

tragen, denn es spielen zu viele Nebenumstände eine Rolle; es sei deshalb kaum möglich, einzelne Einflüsse klarer herauszuschälen. Damit soll in keiner Weise der unzweifelhafte Vorzug der Untersuchungen am Motor für die praktische Ermittlung des Klopfwertes von Kraftstoffen verkannt werden, ebenso wenig die Tatsache, daß die Auswirkungen baulicher Änderungen nur auf diese Weise ermittelt werden können. Die erwähnte Forschungsrichtung versucht daher, durch Untersuchungen in Bomben größere Klarheit über Ursachen und den Verlauf der klopfenden Verbrennung zu erhalten.

So hat A. Köchling [7] im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden, das unter Leitung des inzwischen verstorbenen Prof. Dr. A. Nügel auf dem Gebiete der Motorenforschung führend war, Versuche an einer Bombe an chemisch reinen Kraftstoffen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluß der Luftüberschusszahl, des chemischen Aufbaues der Kraftstoffe, des Anfangsdruckes und der Anfangstemperatur sowie des Sauerstoffgehaltes der Luft und der Brenngeschwindigkeit besonders untersucht. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, die dem Druckverlauf überlagerte Klopfeschwingung oszillographisch zu erfassen. Der größte Klopfeschwingungs-Ausschlag, die mittlere Brenngeschwindigkeit und das größte Drucksteigerungs-Verhältnis abhängig von der Luftüberschusszahl ist beispielsweise für ein Pentan-Luft-Gemisch aus Abb. 2 zu ersehen.<sup>2)</sup>

Es zeigt sich, daß (abgesehen von einer zwischen  $\lambda = 0,7$  und  $\lambda = 0,8$  durch das Auftreten einer Störschwingung hervorgerufenen Dämpfung der Klopfeschwingung) die größten Ausschläge in Bereiche des größten Drucksteigerungsverhältnisses liegen. Ob die Klopfeschwingung überhaupt nur auftritt, wenn das Drucksteigerungsverhältnis einen bestimmten Wert überschreitet, ist aus dem Bericht von Köchling nicht zu ersehen. Auffällig ist,

2) Leider fehlt in der Arbeit [7] die Angabe der Dimension des Drucksteigerungsverhältnisses. Sie läßt sich mangels eines Druckmaßstabes aus den dort wiedergegebenen Oszillogrammen nicht rekonstruieren. Die Ungenauigkeit bei der Beschriftung der Ordinaten in der Veröffentlichung ist bei der vorstehenden Wiedergabe berichtigt.

- 12 -

daß die Klopfeschwingung in der Bombe bei Luftmangel und nur bei wenig über dem theoretischen Wert liegenden Luftverhältnissen auftritt, während im Gegensatz dazu im Motor das Klopfen mit zunehmendem Luftüberschuß meist stärker wird. Sonach bleibt noch zu klären, welche Einflüsse im Motorbetrieb diese Verschiebungen verursachen. Die Klopfeschwingung war nicht nur bei dem als Beispiel erwähnten Pentan-Luft-Gemisch, sondern auch bei einer Reihe anderer Kohlenwasserstoffe, außerdem bei Äthylalkohol, zu beobachten.

Die Unterschiede im Verhalten von Kraftstoffen mit stark voneinander abweichender Klopfestigkeit sind aus Abb. 3 zu ersehen, welche neben dem bereits in Bild 2 wiedergegebenen Verlauf der Klopfeschwingungs-Ausschläge für Pentan den für Benzol zeigt. Es liegt die Vermutung nahe, daß sich die vorerwähnte Störschwingung gerade dort am stärksten bemerkbar macht, wo der Höchstwert des Ausschlages zu erwarten wäre. Immerhin ist aus dem Bild so viel zu erkennen, daß die Klopfeschwingung bei gleichen Versuchsbedingungen im Bereich wesentlich niedrigeren Kraftstoff-Luft-Verhältnisses auftritt, also in merkbar größerem Abstand von dem bei praktischen Betrieb üblichen Verhältnis. Dies stimmt demnach mit der tatsächlich größeren Klopfestigkeit des Benzols überein. Wie sich die größeren Klopfeschwingungs-Ausschläge mit dem Anfangsdruck ändern, ist in Abb. 4 wiedergegeben. Gegenüber dem stetigen Anstieg bei großen Luftüberschuß zeigen sich bei Luftmangel sehr starke Abweichungen von dem allgemeinen, ebenfalls ansteigenden Verlauf, die zunächst noch keine Rückschlüsse erlauben. Immerhin läßt sich feststellen, daß die dem Druckverlauf überlagerte Schwingung im Bereiche der beim Motorbetrieb üblichen Werte des Anfangsdruckes beträchtliche Größen erreichen kann. Dabei ist allerdings zu beachten, daß bei den von Köchling durchgeführten Versuchen die im Motor auftretenden hohen Temperaturen nicht angewendet werden konnten. Eine Steigerung der Temperatur im bescheidenen Maße, wie sie z.B. bei Versuchen mit einem Benzol-Luft-Gemisch angewendet wurde, vgl. Abb. 5, führt entgegen der auf die Erfahrungen

- 13 -

des Motorbetriebes gegründeten Vermutung zu einer Abnahme des Schwingungsausschlages. Dafür fehlt noch eine Erklärung.

Wenn somit, wie das vorerwähnte Beispiel zeigt, die Erscheinungen klopfender Verbrennung im Motor und in der Bombe in gewissen Widersprüchen zu stehen scheinen, so verdient die hier eingeschlagene Forschungsrichtung deshalb Beachtung, weil die durch sie aufgezeigten Schwierigkeiten erst recht Anlaß zu einer eingehenden Durchforschung geben können. Im übrigen sei erwähnt, daß auch bei den im größten Umfang von der General Motors Corporation in den Vereinigten Staaten von Amerika durchgeführten, umfangreichen Untersuchungen [8] die beim Klopfen auftretenden Schwingungen besonders beobachtet wurden. Ihre Frequenz wird mit 3 000 bis 6 000 Hz angegeben, während sich aus den von Köchling veröffentlichten Oszillogrammen bei den wesentlich niedrigeren Anfangsdrücken Werte von etwa 800 bis 1 000 Hz ablesen lassen. Diese Befunde stehen immerhin in gewissem Einklang miteinander. Es möge noch hervorgehoben werden, daß, abgesehen von ganz wenigen Forschern, Einstimmigkeit darüber besteht, daß es sich bei der klopfenden Verbrennung im Motor nicht um eine Detonation in dem in der physikalischen Chemie üblichen Sinne, sondern um eine Erscheinung besonderer Art handelt, die von der Detonation grundsätzlich unterschieden werden muß.

#### b. Analytische und spektroskopische Untersuchung des Klopfens

Schon Ricardo hat den überragenden Einfluß des Kraftstoffes auf das Klopfen erkannt, demgegenüber die sonstigen Betriebsbedingungen sowie die Gestaltung des Verbrennungsraumes von mittelbarer Bedeutung sind. Es lag daher nahe, die Vorgänge im Motor nicht nur durch Aufzeichnen des Druckverlaufs, sondern auch mit den Mitteln des Chemikers zu erfassen. Hierzu dienen vor allem die Analyse und die Spektroskopie. Bei der Schnelligkeit, mit der die Verbrennung abläuft, stan-

- 14 -

den diesen Vorhaben nicht unerhebliche Schwierigkeiten im Wege. Trotzdem wurden Mittel und Wege gefunden, durch gesteuerte Ventile dem Verbrennungsraum zu verschiedenen Zeitpunkten des Verbrennungsablaufes Gasproben zu entnehmen, die nicht nur eine qualitative, sondern zum Teil auch eine quantitative Analyse ermöglichten [9]. Da es bei den unter [4] erwähnten Arbeiten gelang, den Verbrennungsraum im Zylinder sichtbar zu machen, lag es nahe, die Strahlung auch spektroskopisch zu untersuchen, um dadurch näheren Aufschluß über die Vorgänge zu erhalten [10]. Unter den Forschern herrscht weitgehende Übereinstimmung darüber, daß die bei der Oxydation von Kohlenwasserstoffen beobachteten Luminiszenzen und kalten Flammen mit Vorreaktionen zusammenhängen. Die Abhängigkeit der Temperaturen, bei denen diese Erscheinungen beginnen und enden, von dem chemischen Aufbau eindeutig bestimmter Kraftstoffe zeigt eine weitgehende Parallele mit dem bezüglich der Klopfestigkeit bekannten Verhalten dieser Stoffe. Es konnte bei klopfenden Motoren sowohl analytisch als auch spektroskopisch in der Periode vor der Explosion die Bildung von Aldehyden, insbesondere von Formaldehyd festgestellt werden. Dies ist allerdings nicht so zu deuten, daß die Anwesenheit von Formaldehyd als Ursache für das Klopfen anzusehen ist, denn man konnte durch Zugabe von Formaldehyd das Klopfen nicht künstlich erzeugen. Vielmehr ist es als eine Verbindung anzusehen, die bei den als ursächlich betrachteten Vorreaktionen gebildet wird. Über den vermutlichen Reaktionsverlauf bestehen verschiedene Hypothesen. Es bleibt Ziel der Forschung, hierin Klarheit zu schaffen und eine Theorie aufzustellen, die alle Beobachtungen befriedigend erklärt.

Bei den analytischen Untersuchungen wurden weiterhin auch Peroxyde und peroxydische Radikale nachgewiesen, die man schon früher in den Auspuffgasen klopfender Motoren festgestellt hatte [11]. Man nahm ursprünglich an, das Peroxyde in größerer Menge gebildet werden und ihr plötzlicher Zerfall die Ursache des Klopfens sei. Dies konnte auf Grund reaktionskinetischer Betrachtungen als unwahrscheinlich erkannt



- 15 -

werden. Damit ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß die Anwesenheit von Peroxyden das Klopfen fördert, wie von A. Egerton und A. R. Ubbelohde gezeigt werden konnte [12]. Nach dem heutigen Stand der Untersuchungen kann entsprechend der sogenannten Peroxyd-Theorie des Klopfens als sicher angenommen werden, daß die als Zwischenprodukte auch der normalen Verbrennung bekannten Peroxyde für das Klopfen wesentlich sind, indem sie den als Kettenreaktion anzusehenden Vorgang fördern. Die Wirkung der später noch genau zu besprechenden Gegenklopfmittel besteht zweifellos darin, diese Wirkung der Peroxyde aufzuheben und dadurch die Kettenreaktionen abubrechen [13]. Die weitergehenden Behauptungen der Peroxydtheorie sollen als noch nicht völlig erwiesen hier außer Betracht bleiben.

In letzter Zeit haben G. Danköhler und W. Eggersglus analytische Untersuchungen in Zusammenhang mit Untersuchungen von E. Schmidt und E. Mühler unternommen, über die sie ausführlich berichten [14]. In diese Arbeiten jedoch noch kein abschließendes Urteil gestatten, wird auf eine eingehende Wiedergabe verzichtet; die verwendete Apparatur ist aber mit Rücksicht auf die versuchstechnischen Schwierigkeiten beachtlich und vielleicht noch weiter entwicklungsfähig.

#### c. Auswirkung des Klopfens auf die Temperatur der Zylinderwände und des Kolbens, den Wärmeübergang und die Motorleistung

Die Entstehung der in Abschnitt a näher beschriebenen Druckschwingungen, die sowohl im klopfenden Motor, als auch unter gewissen Bedingungen bei Versuchen in der Bombe beobachtet werden, erscheint noch nicht völlig geklärt. Fest steht jedoch, daß sie nicht als Ursache für das Klopfen, sondern eher als eine Folgeerscheinung anzusehen sind. Es liegt jedenfalls der Schluß nahe, daß bei der endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Druckschwingungen und ihrer hohen

- 16 -

Frequenz im Verbrennungsraum auch örtlich erhebliche Druckunterschiede zwischen den einzelnen Raumpunkten auftreten, so daß das Indikatordiagramm je nach Trägheit des Gerätes meist nur zeitliche und räumliche Mittelwerte zeigt.

Fraglich erscheint hingegen, ob die Zustandsänderungen, die z.B. in dem noch nicht verbrannten Gemischrest durch die auftretende Klopfwelle hervorgerufen werden, adiabatisch verlaufen und dementsprechend berechnet werden können. Ist doch schon von der Theorie der Linsenflamme her bekannt, daß in der Brennfläche die Geschwindigkeit sprunghaft ansteigt und daher auf Grund der Energiebilanz dort örtliche Druckunterschiede auftreten müssen. Die Geschwindigkeiten und die mit ihnen zusammenhängenden Druckänderungen sind jedoch bei der normalen Verbrennung so klein, daß diese unbedenklich als adiabatisch angesehen werden können. Wenn diese Annahme jedoch nicht zutrifft, weil die Zustandsänderung nicht umkehrbar verläuft und nicht als unendlich langsam angesehen werden kann, wie es bei echten Detonationen bestimmt der Fall ist, muß die von Hugoniot abgeleitete Gleichung für die - mitunter auch als dynamische Adiabate bezeichnete - Zustandsänderung angewendet werden [6, S. 163]. Nach dieser ergeben sich wesentlich höhere Temperaturen als bei umkehrbaren Vorgängen.

Wenn es sich auch bei der klopfenden Verbrennung, wie bereits am Ende des Abschnittes a erwähnt, um keine Detonation im üblichen Sinne handelt, so treten nach den vorliegenden Beobachtungen immerhin so hohe Geschwindigkeiten auf, daß sie eine Erhöhung der Temperaturen gegenüber den adiabatisch errechneten Werten wahrscheinlich machen. Aus dem oben bereits gezogenen Schluß auf örtliche Drucksteigerungen folgt somit auch die benötigte Annahme, daß örtlich erhebliche Temperaturerhöhungen auftreten. Sie mit Temperaturmeßgeräten nachzuweisen, erscheint wegen deren Trägheit undurchführbar. Hingegen konnten Rassweiler und Withrow diese Annahme durch optische Temperaturmessungen bestätigen [15]. Es ist allerdings zu beachten, daß bei der Auswertung solcher opti-



- 17 -

seher Messungen gewisse Vorsicht am Platze ist, weil der Anregungszustand der Moleküle und Radikale nicht eindeutig festliegt. Immerhin ergibt sich damit eine einfache und zwanglose Erklärung für die bei jedem klopfenden Motor zu beobachtende Erhöhung der Zylinderwand- und Kolbentemperatur. Dies kann allerdings aus begreiflichen Gründen beim Übergang vom nicht klopfenden zum klopfenden Betrieb erst nach einiger Zeit beobachtet werden. Eine Folge der erhöhten Verbrennungsraum-Temperaturen ist ein wesentlich höherer Wärmeübergang, der letzten Endes mehr Wärme an das Kühlwasser abführt und dadurch eine Leistungseinbuße zur Folge hat. Der Kolben kann dabei wegen der aus konstruktiven Gründen wesentlich schlechteren Kühlmöglichkeit beim Klopfen thermisch überbeansprucht und leicht beschädigt werden.

Mittelbar bewirkt der Zwang, bei klopfendem Kraftstoff mit niedrigerem, gewöhnlich durch Drosseln eingestelltem Verdichtungsdruck zu fahren, eine weitere Leistungseinbuße, denn es ergibt sich dadurch bei Berücksichtigung der zusätzlichen Verluste ein niedrigerer Wirkungsgrad. Dies ist neben der unerwünschten Überbeanspruchung des Triebwerks durch das Klopfen einer der Hauptgründe, weshalb im Fahrzeug- und vor allem im Flugzeugbetrieb die Verwendung möglichst klopfester Kraftstoffe angestrebt wird; denn jede diesbezügliche Ersparnis wirkt sich in einer Vergrößerung des Zuladegewichtes oder bei gleichbleibender Kraftstoffmenge in einer Vergrößerung des Fahr- oder Flugbereichs aus.

#### 4. Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen

Nach den vorausgegangenen Erörterungen kann der Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen auf die Neigung zu klopfendem Betrieb leicht beurteilt werden. Gefördert wird das Klopfen nicht nur durch ein hohes Verdichtungsverhältnis, sondern auch durch Überlading, durch Erhöhen der Temperatur von

- 18 -

Ansaugeluft oder Kühlwasser sowie durch Absinken der Drehzahl.

Der Grund für eine Förderung des Klopfens durch Erhöhen des Druckes der angesaugten Luft (Überladung) ist klar, denn diese ergibt einen entsprechend erhöhten Verdichtungsdruck; dieser aber ist eine entscheidende Größe für die Gefahr des Klopfens. Auf gleicher Höhe liegt wegen der Steigerung der Verdichtungs-temperatur der Einfluß einer Verwärmung der Luft, die aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zur Ausnutzung der Abgaswärme oder, beim Höhenflug unter dem Zwange betrieblicher Notwendigkeiten angewendet wird. Befindet man sich an der Klopfgrenze, so läßt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der anwendbaren Überladung und der Luftverwärmung erkennen. Wie später noch auszuführen sein wird, kann er dazu dienen, Kraftstoffe besser zu beurteilen, als dies durch die Oktanzahl, die nur einen einzigen Betriebszustand erfassen kann, möglich ist. Ein Beispiel für diesen Zusammenhang zeigt Abb. 6 nach F. A. F. Schmidt, die das Ergebnis von Versuchen an einem wassergekühlten Motor mit einem Verdichtungsverhältnis von 1 : 7 und einer Drehzahl von 2000 U/min wiedergibt. Daraus ist auch zu ersehen, welchen Einfluß die Luftüberschusszahl  $\lambda$  hat, die neben den aufgezählten Betriebsbedingungen noch als weitere, willkürlich wählbare Betriebsbedingung anzusehen wäre. Es ist jedoch zu beachten, daß man im praktischen Betrieb von einem Wert  $\lambda = 0,85$  bis 0,90 nicht abzugehen trachtet, denn bei niedrigeren Werten steigt wegen der dann eintretenden unvollkommenen Verbrennung der Kraftstoffverbrauch stark an, bei höheren wird hingegen wegen des Rückganges der in den Zylinder gebrachten Kraftstoffmenge die Leistung vermindert. Abb. 7, ebenfalls nach F. A. F. Schmidt, zeigt, daß der Zusammenhang zwischen diesen Größen sich bei Motoren sehr unterschiedlicher Bauart nur wenig ändert. Die einzelnen Werte für den mittleren Nutzdruck  $p_e$  und den Kraftstoffverbrauch  $b_e$  sind des besseren Vergleichs halber so umgerechnet, daß sich bei  $\lambda = 1,0$  für beide Werte 100 % ergeben. Eine Steigerung der Luftüberschusszahl zur Verhinderung

- 19 -

des Klopfens ist daher nur als eine Notmaßnahme zu bewerten und als solche jedem Kraftfahrer geläufig. Es kann hier auch an die in Abschnitt a näher beschriebenen Versuche von A. Köhling erinnert werden, in denen der Einfluß der Luftüberschusszahl bei Bombenversuchen eingehend geprüft wurde.

Die Erniedrigung der Drehzahl fördert deshalb das Klopfen des Ottomotors, weil für den Ablauf der Verbrennung mehr Zeit zur Verfügung steht. Wohl ist die Durchwirbelung der Ladung bei niedrigerer Drehzahl geringer und die Verbrennung dadurch verlangsamt, jedoch nicht in solchem Maße, daß die Gefahr des Klopfens ungeändert bliebe. Das Verhältnis der Dauer des Verbrennungsablaufes zu der eines Kolbenspieles wird dadurch ungünstiger, so daß unter sonst gleichbleibenden Bedingungen bei Absinken der Drehzahl Klopfen eintreten kann. Sinngemäß wird bei Erhöhung der Drehzahl trotz der besseren Durchwirbelung der Verbrennungsablauf nicht im gleichen Maße gefördert, so daß er bezogen auf den Kurbelwinkel mehr Zeit in Anspruch nimmt und dadurch die Gefahr des Klopfens vermindert wird.

### 3. Einzelheiten des Betriebes mit zündträgen Kraftstoffen beim Dieselmotor

Wie schon in der Einleitung zum Hauptabschnitt I hervorgehoben wurde, ist zwischen dem Klopfen des Ottomotors und der beim Dieselmotor mitunter ebenso benannten Erscheinung grundsätzlich zu unterscheiden. Die Betriebsbedingungen beeinflussen den Gang des Dieselmotors, verglichen mit dem Ottomotor, in genau entgegengesetzter Weise. Es handelt sich beim Dieselmotor praktisch ausschließlich darum, den eingespritzten Brennstoff schnell genug zu zünden, um ein dem angestrebten Gleichdruckverfahren möglichst angenähertes Diagramm zu erhalten.

- 20 -

### 2. Wirkung des Zündverzuges auf den Gang des Motors

Unter Zündverzug versteht man den Zeitraum, der vom Beginn der Kraftstoffeinspritzung bis zum Beginn der Zündung verstreicht. Er muß von der bei der Selbstzündung von Gasgemischen zu beobachtenden Induktionsperiode unterschieden werden, weil beim Einspritzen flüssigen Kraftstoffes dieser zuerst verdampft werden muß, damit die Reaktion überhaupt eingeleitet werden kann. Die hierzu erforderliche Zeit ist jedoch von verschiedenen physikalischen Größen abhängig und kann auch bei gleicher Induktionszeit erhebliche Unterschiede aufweisen. Die physikalischen Größen sind vor allem die Geschwindigkeit, mit der der Brennstoffstrahl durch die Düsen in die verdichtete Luft eintritt, der Durchmesser der am Mantel des Strahlkegels zerstäubten Kraftstofftröpfchen und die Verwirbelung des verdichteten Luftinhaltes des Verbrennungsraumes.

Der Zündverzug setzt sich somit aus mindestens zwei noch näher zu besprechenden Abschnitten zusammen, von denen der erste mehr physikalischer und der zweite mehr chemischer Natur ist. Wesentlichen Einfluss auf ihn hat auch die Gestaltung des Verbrennungsraumes und die Frage, ob eine Vorkammer, ein Luftspeicher, besondere Formen des Kolbenbodens oder ähnliche Maßnahmen getroffen werden. In dieser Hinsicht weisen die Dieselmotoren eine wesentlich größere Mannigfaltigkeit der Bauformen auf als die Ottomotoren.

Es ist weiterhin noch folgendes zu beachten: Der Zündverzug kann, wie dies im allgemeinen der Fall ist, dazu führen, daß sich bei Eintritt der Zündung im Zylinder bereits eine so große Kraftstoffmenge vorfindet, daß der Druck, ganz abweichend vom praktisch nie zu erreichenden Verlauf des Gleichdruckverfahrens, sehr schnell ansteigt und dadurch ähnliche mechanische Überbeanspruchungen des Triebwerkes auftreten wie beim klopfenden Ottomotor. Dies ist in Abb. 8 schematisch nach Soerlage und Breaza dargestellt [16]. Diese Erscheinung ist dann zu beobachten, wenn der Kraftstoff wegen seiner chemischen Beschaffenheit spät zündet, der Verbrennungsrauminhalt



- 24 -

jedoch gut durchmischt ist und die einmal eingetretene Zündung schnell durchgreift.

Der Zündverzug kann jedoch bei schlechter Gemischbildung in einen Verbrennungsverzug ausarten, bei dem es gar nicht zu dem erwähnten plötzlichen Druckanstieg kommt, vielmehr die Verbrennung schleichend vor sich geht und dadurch zu Leistungs- und Wirkungsgradverlusten führt. Dies sind unerwünschte Erscheinungen, die ebenfalls durch den Zündverzug verursacht sind, ohne daß dabei ein Klopfen der Maschine zu beobachten ist. Eine Beseitigung dieses Mangels ist dann mehr eine Frage der Bauform.

Daß aber andererseits der Zündverzug nicht ausreicht, die Eignung eines Dieselmotorkraftstoffes zu kennzeichnen, läßt sich z.B. an Hand der Abb. 9 a, b und c zeigen. Dort sind dem Zündverzug in Abhängigkeit von der je Zylinder zugeführten Wärmemenge die Drucksteigerung  $\frac{dp}{dt}$  und der höchste Druck  $p_{max}$  gegenübergestellt.

Dabei zeigt sich, daß Rückschlüsse vom Zündverzug allein auf die Betriebseigenschaften eines Kraftstoffes nicht zulässig sind. Die Drucksteigerung z.B. weist trotz nicht allzu großer Unterschiede im Zündverzug erhebliche Abweichungen auf.

Für den Zündverzug und die anschließende Verbrennung sind die der Zündung unmittelbar vorausgehenden Vorgänge wichtig, die als Aufbereitung des Brennstoffes bezeichnet werden können. Denn im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Ottomotor, bei dem Brennstoff und Luft gut durchmischt in den Zylinder kommen, sind beim Dieselmotor, wie erwähnt, besondere Maßnahmen baulicher Art nötig, um dem Indikator diagramm den gewünschten Verlauf zu geben. Es sei deshalb wegen des engen Zusammenhanges zwischen dem Zündverzug und dem Verbrennungsablauf auf die Arbeiten von K. Zimmer verwiesen, der sich zum Teil auf Grund von Versuchen im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule Dresden mit den diesbezüglichen Fragen eingehend beschäftigte [17].

Zimmer weist insbesondere auf die Temperaturabhängigkeit der den Zündverzug bildenden Teilvorgänge hin, die er in Zer-

stäubung und Mischung, Erwärmung und Verdampfung, sowie Verreaktionen unterscheidet. Überlegungen, die sich hieran anschließen, führen dazu anzunehmen, daß bei niedrigeren Lufttemperaturen die chemischen Reaktionen wegen ihrer starken Abhängigkeit von der Temperatur ausschlaggebend sind; denn dann erfordern sie wegen der zu kleinen Reaktionsgeschwindigkeit beträchtliche Zeit, der gegenüber die übrigen Vorgänge nicht so ins Gewicht fallen. Bei hohen Temperaturen sind hingegen die von ihnen in geringem Maße abhängige Zerstäubung und Mischung wohl als maßgebend anzusehen. Die Verdampfungsgeschwindigkeit nimmt eine mittlere Stellung ein, weil sie von der Temperatur zwar abhängt, doch nicht in demselben Maße wie die chemische Umsetzungsgeschwindigkeit.

Da nun nach allgemeinen Beobachtungen der Gesamtzündverzögerung mit steigender Lufttemperatur sehr stark abnimmt und sein Betrag weitgehende Übereinstimmung mit den für einen bestimmten Kraftstoff auf Grund seines chemischen Molekülaufbaues zu erwartenden Wert aufweist, ist der Schluß zulässig, daß bei den Verhältnissen im Dieselmotor die chemischen Reaktionen von entscheidender Bedeutung sind. Eine gewisse näher zu beschreibende Art von Beobachtungen, die mit dieser Annahme in Widerspruch zu stehen scheint, läßt sich folgendermaßen erklären:

Setzt man die bei adiabatischer Verdichtung von Kraftstoffdampf-Luft-Gemischen gemessenen Zündverzögerungszeiten als Induktionszeiten zur Berechnung der Aktivierungswärme der betreffenden Kraftstoffe ein, - denn eine physikalische Aufbereitung ist in diesem Falle nicht nötig, - so erhält man Ergebnisse, die sich mit denen aus anderen Beobachtungen decken [6; S. 285, 463 u. 574]. Im Falle der Einspritzung von flüssigem Kraftstoff in verdichtete heiße Luft führt diese Rechnung nur dann zu übereinstimmenden Ergebnissen, wenn die Lufttemperatur niedrig ist; bei Temperaturen von  $600^{\circ}\text{C}$  aber, wie sie am Ende der Verdichtung im Dieselmotor herrschen, ergibt die Rechnung für die Aktivierungswärme zu kleine Werte. Dies läßt sich aufklären, wenn man die Abkühlung der verdichteten Luft durch den ein-



- 23 -

dringenden kalten Kraftstoff berücksichtigt. Man darf die Reaktionstemperatur nicht der Lufttemperatur vor der Einspritzung gleichsetzen. Diese örtliche Temperaturerniedrigung kann im Hauptverbrennungsraum eines Dieselmotors durch Aufnahmen von Indikator-Diagrammen kaum erfasst werden. Dagegen kann man in Diagrammen, die F. Dreihaupt / 18 / vom Druckverlauf im Hauptverbrennungsraum und in den beiden Luftspeichern eines Dieselmotors Bauart Lanova veröffentlichte, die mit dem Eindringen des Kraftstoffes durch die Abkühlung hervorgerufene gleichzeitige Senkung der Verdichtungslinie leicht erkennen. Eine solche Beobachtung ist an dem erwähnten Motor deshalb gut möglich, weil der Inhalt der beiden Speicher nur einen Bruchteil des gesamten Verbrennungsraumes ausmacht und sich die örtliche Zustandsänderung daher stark auswirkt.

Neben dem Einfluß, den die Zündwilligkeit eines Kraftstoffes auf den Verlauf des durch das Indikator-Diagramm wiedergegebenen Druckes im Zylinder und damit auf die "Härte" des Ganges der Maschine hat, ist sie auch noch für das Anlassen, besonders aus dem kalten Zustande, wichtig. Es kann bei ungenügend zündwilligen Kraftstoffen vorkommen, daß dann überhaupt keine Zündung eintritt. Diese Tatsache wird zur Prüfung von Dieselmotoren mit Hilfe des Anlaufverfahrens benutzt. Einzelheiten werden in Abschnitt II 1 d) erörtert.

#### b. Einfluß verschiedener Betriebsbedingungen

Gegenüber den Verhältnissen beim Klepfen des Ottomotors zeigt sich, daß die Betriebsbedingungen den Zündverzug beim Dieselmotor in umgekehrter Richtung beeinflussen. Die Erhöhung des Ansaugdruckes wirkt sich in einer Steigerung des Verdichtungsdruckes aus, der für die Zündung förderlich ist. Dasselbe gilt für die durch Erhöhung der Ansauglufttemperatur bewirkte höhere Verdichtungs- und Temperatur. Drosselung im Ansaugestutzen kann hingegen, wenn man sich an der Grenze be-

- 24 -

findet, durch Erhöhung des Zündverzuges den Gang des Motors wesentlich beeinträchtigen. Für den Fahrzeug- und Flugzeugbetrieb, der möglichst hohe Drehzahlen anstrebt, ist es wichtig, daß für solche Bedingungen besonders zündwillige Kraftstoffe zur Verfügung stehen müssen, weil die absolute Dauer des Zündverzuges bei sonst gleichbleibenden Bedingungen, wie Form und Zarstäubung des Brennstoffstrahles, Ausbildung des Verbrennungsraumes usw., praktisch gleich bleibt. Bei zunehmender Drehzahl erstreckt sich daher der Zündverzug über einen immer größer werdenden Kurbelweg und kann dadurch den Gang des Motors beeinträchtigen. Bei unveränderten Einspritzzeitpunkt setzt aber die Verbrennung nicht nur bei einem später erreichten Kurbelwinkel ein, sondern benötigt auch einen längeren Kurbelweg. Dies läßt sich zwar ausgleichen, wenn man den Einspritzzeitpunkt ververlegt. Doch ergibt sich dadurch eine wesentliche Veränderung des Diagrammcharakters; in Abb. 10 a und b sind die Verhältnisse rein schematisch erläutert. Dort zeigt Kurve a in Bild 10 a die Kompression ohne Einspritzung, b den Druckverlauf mit Einspritzung des Kraftstoffes bei einer als normal angenommenen Drehzahl. Wird diese um 50 % erhöht und verschiebt man den Einspritzzeitpunkt nur so weit vor, daß der Brennstoffstrahl beim selben Kurbelwinkel mündet, so ergibt sich unter Annahme sonst gleichbleibender Verhältnisse - was streng genommen nicht zutrifft - bereits eine starke Verschlechterung des Indikator-Diagrammes, wie dies Kurve c in Abb. 10 b zeigt. Sie ist aus der gleichbenannten Kurve in Bild 10 a abgeleitet.

Den Grenzfall stellt die Kurve d dar. Sie gibt - ebenfalls rein zeichnerisch entwickelt - die Verhältnisse wieder, wenn man den Brennstoff so zeitig einspritzt, daß das Ende der Verbrennung beim selben Kurbelwinkel erreicht wird, wie bei dem Verlauf nach Kurve b. Es zeigt sich, daß dann das Diagramm wohl verbessert ist, doch ist der Druckanstieg nach der Zündung, der sich dem der Kompression überlagert, steiler und außerdem die Druckspitze höher. Beim praktischen Betrieb

- 25 -

können sich hierbei noch wesentlich ungünstigere Verhältnisse ergeben.

#### 4. Das gegensätzliche Verhalten kloppfreudiger und zündwilliger Kraftstoffe

Aus den vorhergehenden Ausführungen war bereits in groben Zügen zu erkennen, daß alle äußeren Bedingungen, die das Klopfen beim Ottomotor verhindern und für diesen von Vorteil sind, den Zündverzug vergrößern und deshalb beim Dieselmotor zu vermeiden sind. Es ergab sich dabei, daß der chemische Aufbau der verwendeten Kraftstoffe den größten Einfluß auf das Betriebsverhalten beider Arten von Motoren hat. Dies ging aus den ersten Versuchen, die Ricardo durchführte, noch nicht mit solcher Klarheit hervor, mit der man heute die Zusammenhänge überblickt. Der Grund dafür mag wohl darin zu suchen sein, daß sich ursprünglich die Mitarbeit der Chemiker auf die bis dahin üblichen Untersuchungen konventioneller Kenngrößen der Kraftstoffe beschränkte. Wurde doch anfangs die Erforschung des Klopfvorganges fast ausschließlich von Motorenbauern betrieben.

Man hat auch erst im Laufe der Zeit die durch den chemischen Aufbau der Kraftstoffe gegebenen Gesetzmäßigkeiten richtig einzuschätzen gelernt und ihre Eignung für den motorischen Betrieb in Übereinstimmung mit dem dem Chemiker geläufigen Reaktionsverhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffe erkannt. Die diesbezüglichen Ansichten fanden eine in dem Maße stärker werdende Stütze, als zahlreiche chemisch reine Stoffe in Bezug auf Klopfestigkeit und Zündwilligkeit untersucht wurden. Denn solange man in der Hauptsache aus Erdöl gewonnene Benzine und Dieselmotorkraftstoffe prüfte, waren die Zusammenhänge mit dem chemischen Aufbau nicht ohne weiteres zu durchschauen. Solche Kraftstoffe stellen immer ein Gemisch aus zahlreichen Einzelstoffen dar, deren Moleküllbau und Anteil an dem zu prüfenden Kraftstoff je nach Herkunft erheblichen Schwankungen unterlie-

- 26 -

gen. Geringfügige Änderungen in der Art der Behandlung und Bearbeitung - z.B. Änderungen der Reaktionstemperaturen beim Spalten - können eine tiefgreifende Wandlung des Molekülbaues zur Folge haben oder den Anteil der Olefine sehr stark beeinflussen. Damit geht aber gleichzeitig eine Änderung der Klopf-festigkeit einher.

Heute ist man sich darüber völlig im klaren, welche Bedeutung es hat, ob ein als Kraftstoff verwendeter Kohlenwasserstoff kettenförmige oder ringförmige Moleküle besitzt, ob und wieviele Verzweigungen oder Doppelbindungen er aufweist und wo diese im Molekül sitzen. Es sollen deshalb nachstehend kurz die wichtigsten Gruppen von Kohlenwasserstoffen nach der in der organischen Chemie üblichen Systematik besprochen werden. Sie sind es, die fast ausschließlich für Kraftstoffe in Frage kommen. Andere organische Verbindungen, die außer Kohlenstoff und Wasserstoff noch Sauerstoff, Stickstoff oder Schwefel enthalten, spielen mit Ausnahme von zwei Alkoholen und einem Äther praktisch nur als Begleitstoffe eine mitunter nicht unwesentliche Rolle. Die Alkohole und Äther lassen sich von den Kohlenwasserstoffen leicht ableiten, wie in Abschnitt e näher gezeigt wird.

#### a. Die Hauptgruppen der Kohlenwasserstoffe

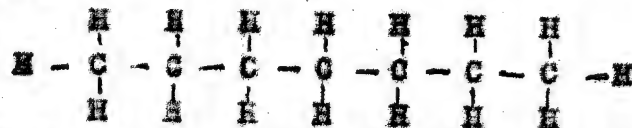
In der organischen Chemie unterscheidet man zunächst die zwei großen Gruppen der kettenförmig und der ringförmig gebauten Kohlenwasserstoffe. Zu den ersten gehören (außer den beiden Permanentgasen Methan  $\text{CH}_4$  und Äthan  $\text{C}_2\text{H}_6$  sowie den Flüssiggasen Propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  und Butan  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) die den Hauptbestandteil zahlreicher Erdöle bildenden Verbindungen Pentan, Hexan, Oktan usw. mit der allgemeinen Bruttoformel  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ; ihr Name wird vom Pentan ab aus dem der Kohlenstoffatomzahl entsprechenden griechischen Grundzahlwort gebildet. Diese Verbindungen werden (unter Benützung des im gewöhnlichen Sprach-



- 27 -

gebrauch nur für die hochmolekularen Vertreter gebräuchlichen Namens) als Paraffine bezeichnet. Man nennt sie auch Aliphaten, aliphatische oder azyklische Verbindungen, mitunter auch Alkane. Sie zeigen sich mit wachsender Atomzahl zunehmendes Ansteigen der Schmelz- und Siedetemperaturen, wie aus Abb. 11 zu sehen ist. Die höhermolekularen Stoffe dieser Reihe finden sich in den höher siedenden Fraktionen paraffinbasischer Erdöle.

Die Strukturformel dieser Stoffe hat beispielsweise folgendes Aussehen:



Wenn diese Verbindungen alle Kohlenstoffatome in einer unverzweigten Kette zeigen, nennt man sie zur Unterscheidung von sofort anschließend zu besprechenden Kohlenwasserstoffen gleicher Bruttoformel Normalparaffine; der vorstehend dargestellte Kohlenwasserstoff ist also n-Heptan (Normalheptan).

Es gibt aber auch Kohlenwasserstoffe, bei denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch Seitenketten der allgemeinen Formel  $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$  (sog. Radikale, Alkyle) ersetzt sind. Sie weisen dann dieselbe Bruttoformel auf wie die Normalparaffine gleicher Kohlenstoffatomzahl, besitzen jedoch eine abweichende Anordnung der Atome. Diese Erscheinung wird als Isomerie bezeichnet, die Stoffe werden Isoparaffine genannt. Als Beispiel sei die Strukturformel des für den Motorbetrieb so wichtigen Isooktans wiedergegeben, das entsprechend der bei den Chemikern üblichen Benennungsweise auch den Namen 2,2,4-Trimethylpentan hat.<sup>3)</sup> Diese ist nur eines von den 18 möglichen Isome-

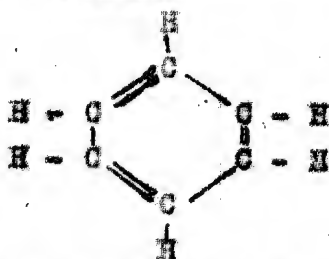
3) Die dem Namen vorgesetzten Zahlen kennzeichnen das von einem Ende der Kette an nummerierte Kohlenstoffatom, an dem die Verzweigung sitzt. Die Endung -yl wird zur näheren Kennzeichnung der um ein Wasserstoffatom verminderten Radikale statt der Endung "-an" an den Stamm des Namens für das entsprechende Paraffin gehängt. Radikale bezeichnet man in Formeln allgemein mit "-R", insbesondere wenn es sich um aliphatische Radikale handelt. Für die Radikale der noch zu besprechenden ringförmigen Kohlenwasserstoffe (der Aromaten) wird demgegenüber "-Ar" verwendet, wenn es auf die Unterscheidung besonders ankommt.





- 29 -

Während die Reihen der kettenförmigen Kohlenwasserstoffe mit Gliedern beginnen, die bei den gesättigten Verbindungen ein Kohlenstoffatom, bei den einfach ungesättigten Verbindungen zwei Kohlenstoffatome besitzen, ist von den nunmehr zu betrachtenden ringförmigen Kohlenwasserstoffen das Benzol  $C_6H_6$  die einfachste Verbindung. Seine ausgezeichnete Stellung in der Systematik der organischen Chemie bedarf einer kurzen Erläuterung. Obwohl es seiner Bruttoformel nach sehr arm an Wasserstoff erscheint, besitzt es nur in geringem Maße die Eigenschaften einer ungesättigten Verbindung. Die Ursache hierfür ist darin zu suchen, daß die Kohlenstoffatome im Benzol eine Bindung besonderer Art aufweisen. Als sicher ist dabei anzusehen, daß sie einen symmetrischen Sechsering bilden; von jedem Kohlenstoffatom ist außer den Bindungen zu den beiden Nachbarn noch eine dritte nach den Innern des Ringes gerichtet, so daß zur Bindung von Wasserstoff oder einem Substituenten an jedem Kohlenstoffatom nur eine Bindung frei ist. Die Strukturformel wird gewöhnlich nach Kekulé

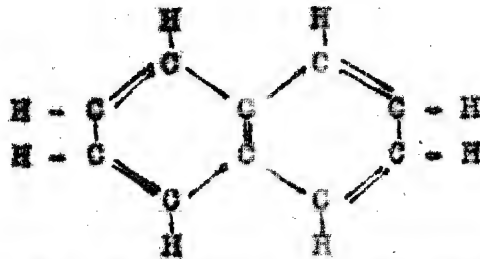


geschrieben, doch ist die darin dargestellte Doppelbindung der bei Olefinen vorkommenden keineswegs gleichwertig;<sup>5)</sup> der zweite Valenzstrich wird bei abgekürzter Darstellung, wenn Zweifel nicht entstehen können, weggelassen.

Das Benzol kann als Ausgangsstoff der sämtlichen aromatischen Verbindungen (Aromaten) betrachtet werden, sei es, daß mehrere Ringe in der Art, wie dies beim Naphthalin  $C_{10}H_8$  mit der Strukturformel

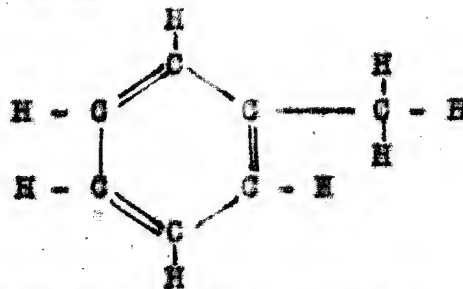
<sup>5)</sup> Vgl. hierzu die Arbeiten von Hückel [20] und Müller [19].

- 30 -



der Fall ist, aneinander geschlossen sind, sei es, daß statt eines Wasserstoffatoms an das Benzol oder an eine Mehr ringverbindung weitere aliphatische oder aromatische Radikale angegliedert sind. Die Bedeutung der Buchstaben und für die Stellung von Radikalen oder den noch zu erwähnenden funktionellen Gruppen wird an einem Beispiel gezeigt werden.

Ein Benzolabkömmling ist z.B. das von Ricardo bei seinen Klopffwertbestimmungen benutzte Toluol, das Methylbenzol mit der Strukturformel



die gewöhnlich abgekürzt durch  $C_6H_5 \cdot CH_3$  wiedergegeben wird.

Wie sich auf Grund von theoretischen Erwägungen und praktischen Erfahrungen beweisen läßt, stellt der Benzolring gegenüber Ringsystemen mit einer größeren oder kleineren Anzahl von Kohlenstoffatomen die stabilste Verbindung dar. Die sechs Kohlenstoffatome liegen nahezu in einer Ebene. Es gibt in der organischen Chemie auch eine Anzahl von Fünfer ringverbindungen; sie sind noch einigermaßen stabil, sind jedoch bereits leichter zu stören, als das Benzol, ähnlich wie ein mit inneren Spannungen behafteter Körper leichter zerstört oder verformt werden kann. Ringe mit vier oder drei Gliedern können, wie die Erfahrung zeigt, nur unter äußerst günstigen Umständen bestehen, während bei mehr als sechs Gliedern eine

- 31 -

gewisse Beweglichkeit der einzelnen Kettenglieder gegeneinander gegeben ist. Sie nimmt mit der Zahl der Kohlenstoffatome sehr stark zu und führt leicht zum Zerreißen der geschlossenen Kette.<sup>6)</sup>

Die ausgezeichnete Stellung des Benzols kommt schließlich noch dadurch augenfällig zum Ausdruck, daß der Graphit die gleiche Atomgruppierung wie das Benzol erkennen läßt; er kann als Endglied einer reiblosen Dehydrierung pflanzlicher, also organischer und letzten Endes von Kohlenwasserstoffen ableitbarer Verbindungen angesehen werden. Die von den Verbindungslinken der Kohlenstoffatome eingeschlossener Winkel sind fast die gleichen wie beim Benzol, ebenso die Abstände zwischen den Atomen. Sein Kristallaufbau ist in Abb. 12 neben dem des Diamanten wiedergegeben und zeigt deutlich die Sechsecken-Anordnung der Kohlenstoffatome in den Schichtenebenen. Auch hier ist die Bindung innerhalb der Ringe besonders eng; daß

- 6) Der abgeschlossene Bau des symmetrischen Benzolmoleküls weist eine gewisse Parallele mit den Edelgasen auf. Diese verdanken ihre chemische Stabilität der Tatsache, daß bei ihren Atomen eine Elektronenaußerschale gerade abgeschlossen ist und keine Valenzpunktelektroden vorhanden sind. Die ihnen im periodischen System vorausgehenden Halogene, bei denen noch ein Elektron fehlt, und die ihnen folgenden Alkali-Metalle mit einem überschüssigen Elektron sind dagegen als sehr reaktionsfähig bekannt.

Beim Molekül des Benzols stehen in der Außenschale jedes Kohlenstoffatoms je vier Elektronen, in den einzigen Schalen der sechs Wasserstoffatome je sechs, zusammen also 30 Elektronen zur Verfügung. Von diesen werden für die C-H-Bindungen  $2 \times 6$  und für die C-C-Bindungen nochmals  $2 \times 6$  Elektronen, zusammen also 24 Elektronen benötigt. Wie die Quantentheorie zeigt, ist eine Lokalisierung der sechs verbleibenden Elektronenverbindungen des Ringes im Sinne der Formel von Kekule oder einer der anderen vorgeschlagenen Formeln gar nicht möglich. Diese Elektronen sind nicht einzelnen Atomen, sondern dem gesamten System zuzuordnen, das sich in diesem Fall in einem durch die Zahl "Sechs" ausgezeichneten, energiereichsten Zustand befindet.

Die Stabilität der Ringverbindungen findet auch in der Deformation der Valenzwinkel ihren Ausdruck. Diese beträgt bei einer Kohlenstoffatomzahl von  $49^{\circ}23'$ ,  $49^{\circ}28'$ ,  $10^{\circ}28'$ ,  $60^{\circ}$ . Bei mehr als sechs Kohlenstoffatomen ist die Anordnung im Ring bei steigender Beweglichkeit der Glieder gegeneinander immer möglich.

- 12 -

die eine an jedem Atom verbleibende Bindung schwächer ist, kann man schon aus dem größeren Atomabstand zwischen den Schichtebenen erkennen, der die bekannte Blättchenform des Graphits erklärt. Beim Diamant sind hingegen alle Atomabstände gleich. Jedes Kohlenstoffatom erscheint im Mittelpunkt eines regelmäßigen Tetraeders. Dies läßt den Zusammenhang mit den aliphatischen Verbindungen erkennen, bei denen nach der Theorie von van t'Hoff und Baeyer die vier Bindungen des Kohlenstoffatoms nach den Eckpunkten eines Tetraeders gerichtet sind. Die räumliche Lage der Kohlenstoffatome eines Paraffinkohlenwasserstoffes ist in Abb. 13 wiedergegeben. Die Wasserstoffatome muß man sich entsprechend der Anordnung in einem Tetraeder aus der Zeichenebene herausgedreht denken.

Außer den vom Benzol abgeleiteten Ringkohlenwasserstoffen gibt es auch solche, bei denen jedes Kohlenstoffatom zwei Wasserstoffatome trägt, die also im Sinne der bei den kettenförmigen Kohlenwasserstoffen angewendeten Ausdrucksweise als gesättigt zu betrachten wären. Zwar haben sie in der organischen Chemie nur eine untergeordnete Bedeutung, kommen jedoch in manchen Erdölen, so z.B. in denen des Bakugebietes und in zahlreichen westukrainischen Quellen vor. Sie werden Naphthene, Zykloparaffine oder Hydroaromaten genannt. Ihre allgemeine Bruttoformel ist  $C_nH_{2n}$ . Sie sind also den Monocolefinen isomer, ihr Verhalten weicht aber von deren Verhalten sehr stark ab; vielmehr ähneln ihre Eigenschaften denen der gesättigten Kohlenwasserstoffe der Paraffinreihe.

Schließlich gibt es noch solche Zyklolverbindungen, welche echte Koppelbindungen im Ring enthalten und dementsprechend als Zykloolefine, Zykloolefine usw. bezeichnet werden. Bei ihnen ist die Zahl sechs für die Anzahl der Kohlenstoffatome im Ring nicht mehr so ausgeprägt. Hierher gehört z.B. das Zyklopentadien  $C_5H_6$  mit der Strukturformel



- 33 -



das sich besonders beim Kracken von Benzin bildet und von manchen Forschern wegen seines stark ungesättigten Charakters für die Neigung zur Harzbildung verantwortlich gemacht wird.

b. Das Reaktionsverhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffverbindungen und ihr Vorkommen in den Kraftstoffen

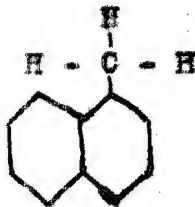
Für die Verwendung eines Kraftstoffes ist in erster Linie von Wichtigkeit, wie er sich gegenüber dem Angriff von Sauerstoff bei hohen Temperaturen verhält. Wenn auch die Kenntnis der Reaktionsfähigkeit ganz allgemein, also auch unter anderen Bedingungen, wegen der Zusammenhänge mit der hier zu betrachtenden für die Forschung von Interesse ist, so soll sich die folgende Darstellung doch ausschließlich auf die Oxydation bei hohen Temperaturen beschränken. Jede Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit der stöchiometrisch erforderlichen Menge von Sauerstoff, d.h. also, jede vollständige Oxydation führt immer zu den beiden Endprodukten Kohlendioxyd  $\text{CO}_2$  und Wasser  $\text{H}_2\text{O}$ . Über die Zwischenstufen, die dabei durchlaufen werden, besteht in der Forschung noch keine endgültige Klarheit. Sicher ist, daß im Flammenspektrum von Kohlenwasserstoffen die Banden der Radikale  $\text{CC}$ ,  $\text{CH}$  und  $\text{OH}$  nachgewiesen werden können. Die Kenntnis der Intensität dieser Strahlungen ist wichtig, um bei der Untersuchung abnormalen Verbrennungsvorgänge, wie z.B. beim Klopfen, die kennzeichnenden Unterschiede herausfinden zu können. Eine scharfe Unterscheidung zwischen dem Verhalten der verschiedenen Kohlenwasserstoffgruppen, wie sie aus der Erfahrung des motorischen Betriebes bekannt ist, war bisher bei

- 34 -

normaler Verbrennung durch spektroskopische und analytische Untersuchung noch nicht möglich. Man muß sich daher auf die Beschreibung der Erscheinungen

gen als solche beschränken und versuchen, ihre Besonderheiten zunächst durch allgemeine Überlegungen verständlich zu machen.

Die kettenförmigen Normalparaffine, deren Moleküle ein Kohlenstoffgerüst aufweisen, wie es in Abb. 13 für das n-Heptan dargestellt ist, unterliegen offenbar sehr leicht dem Angriff des Sauerstoffes bei hoher Temperatur. Eine Folge davon ist der nachgewiesene geringe Zündverzögerung bei Dieselölen, die aus paraffinbasischen Erdölen hergestellt werden. Damit erklärt sich auch die hervorragende Zündwilligkeit der durch Synthese nach Fischer-Tropsch gewonnenen Kogasine. Diese bestehen fast nur aus Normalparaffinen, deren Kohlenstoffatomzahl je nach dem Siedebereich in der Größenordnung von 15 bis 20 liegt. Das heute als Standardkraftstoff verwendete Zetan (Hexadekan) hat die Formel  $C_{16}H_{34}$ . Ihm wird als Kennzeichen der Zündwilligkeit die Zetanzahl 100 zugewiesen. Um nun Bickkraftstoffe mit abnehmender Zündwilligkeit zu erhalten, wird es mit  $\alpha$ -Methylnaphthalin gemischt, dem die Zündwilligkeit null beigelegt wird. Die Zündwilligkeit irgend eines Kraftstoffes wird dann mit der Zetanzahl x bezeichnet, wenn seine Zündeigenschaften denen eines Gemisches aus x Volum-% Zetan und (100 - x) Volum-%  $\alpha$ -Methylnaphthalin gleich sind. Das  $\alpha$ -Methannaphthalin ist eine Zweiringverbindung, deren Strukturformel wie folgt aussieht:



Die Bruttoformel lautet  $C_{10}H_7 \cdot CH_3$ . Wie sein Name sagt, ist das Radikal Methyl- $CH_3$  in  $\alpha$ -Stellung angelegt. Dies muß beachtet werden, weil die Stellung von Einfluß auf die Konstitution des betreffenden Stoffes ist.

Aus der Gruppe der sehr zündträgen Naphthalinverbindungen,



- 35 -

von denen die meisten bei Zimmertemperatur fest sind, eignet sich das  $\alpha$ -Methylnaphthalin deshalb als Standardkraftstoff, weil es einen tiefen Schmelzpunkt ( $-22^{\circ}\text{C}$ ) hat und sein Siedepunkt von  $241^{\circ}\text{C}$  im Siedebereich üblicher Dieselmotorstoffe liegt. Demgegenüber wäre das  $\beta$ -Methylnaphthalin, das sicher ebenso zündträge ist, mit seinem Schmelzpunkt von  $+34,1^{\circ}\text{C}$  bei fast gleichem Siedepunkt als Vergleichskraftstoff völlig ungeeignet.

Die Kogasine weisen Zetanzahlen bis zu 100 und darüber auf; in reinem Zustand ist ihre Zündwilligkeit so gut, daß sie für Motoren der heute üblichen Bauarten nicht voll zur Geltung kommt. Die Kogasine werden deshalb mit Vorteil dazu verwendet, in Mischung mit zündträgen Kraftstoffen gute Dieselmotoren zu liefern. So berichtet z.B. H. Kölbl von Versuchen, die, über eine lange Zeit ausgedehnt, zu dem Zwecke angestellt wurden, aus Steinkohlenteerölen, deren Zündträgheit bekannt und anschließend noch näher erörtert wird, Misch-Dieselmotorstoffe herzustellen. Diese müssen nicht nur zündwillig sein, sondern dürfen bezüglich Lagerfähigkeit, Korrosionsneigung, Mischbarkeit und Verkokungsneigung handelsüblichen Dieselmotorstoffen nicht nachstehen [21]. In Abb. 14 sind die Ergebnisse von Versuchen an einem Vierzylindermotor mit einer Leistung von 30/35 PS bei 1450 U/min wiedergegeben. Der erwähnte Misch-Dieselmotorstoff bestand aus 55 Teilen Steinkohlenteeröl und 45 Teilen Kogasin. Seine Eigenschaften sowie die des zum Vergleich herangezogenen Markenmotorstoffes ausländischer Herkunft können Zählentafel 1 entnommen werden. Die gute Eignung eines solchen Misch-Dieselmotorstoffes ist deutlich zu erkennen. Bei der Mischung von Motorstoffen zeigt sich, daß für die Zündwilligkeit ganz allgemein, nicht nur gemäß Definition für die beiden Standardmotorstoffe, ein additives Gesetz gilt, d.h. es ist die in Zetanzahlen ausgedrückte Zündwilligkeit:

$$Z = Z_s + (Z_g - Z_s) \times$$

wenn  $Z_s$  die Zetanzahl des zündträgen,

$Z_g$  die Zetanzahl des zündwilligen Motorstoffes und

- 35 -

x den als Dezimalbruch ausgedrückten Anteil eines zündwilligen Kraftstoffes mit der Zetanzahl  $Z_g$  bedeuten. Die Steinkohlenteeröle, deren Verwendung in Dieselmotoren wegen ihrer Zündträgheit erhebliche Schwierigkeiten bereitet - liegt doch ihre Zetanzahl gewöhnlich in der Nähe von 20 und darunter - bestehen fast ausschließlich aus ringförmigen Kohlenstoffen von der Art des Benzols und seiner höheren Homologen. Das bereits erwähnte  $\alpha$ -Methyl-Naphthalin  $C_{10}H_7 \cdot CH_3$  ist eine solche Verbindung und wird aus Steinkohlenteer gewonnen.

Die Steinkohlenteeröle werden so wie die übrigen Erzeugnisse der trockenen Steinkohlendestillation während des Prozesses Temperaturen bis zu  $1000^\circ C$  und darüber unterworfen. Sie können deshalb als Endstufen einer weitgehenden Pyrolyse angesehen werden. Nach dem, was in Abschnitt a über die Stabilität der Kohlenwasserstoffe gesagt wurde, ist es nicht verwunderlich, daß sie sich fast ausschließlich aus Aromaten zusammensetzen, denn diese zeigen unter den Kohlenwasserstoffen die größte Widerstandskraft gegen Zersetzung und verhalten sich deshalb besonders zündträge. Sie stammen größtenteils aus dem Bitumen der Steinkohlen und enthalten außer reinem Kohlenwasserstoff auch noch sauerstoff-, stickstoff- und schwefelhaltige organische Verbindungen meist ringförmigen Charakters.

Bei der synthetischen Herstellung von Kraftstoffen, bei der hauptsächlich das Verfahren von Fischer-Tropsch angewendet wird, werden die Kraftstoffmoleküle aus den einfachsten Bausteinen Kohlenoxyd CO und Wasserstoff  $H_2$  aufgebaut. Durch Wahl der Arbeitsbedingungen ist es möglich, Kohlenwasserstoffe gewünschter Struktur zu erhalten. Die nach den Vorschlägen von Fischer-Tropsch verwendeten Katalysatoren ergeben fast ausschließlich kettenförmige Kohlenwasserstoffe, und zwar in der Hauptsache Paraffine und einen geringeren Anteil von Olefinen. Bei dem zweiten Verfahren zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus Kohle, nämlich der Hochdruckhydrierung, liegen die Verhältnisse grundsätzlich anders. Die hydrierbare Kohlenstoffsubstanz hat vorwiegend aromatischen Charakter. Durch die Hydrierung wird

- 37 -

er nicht grundlegend geändert, vielmehr werden die Makromoleküle in Mizellen aufgespalten (in Moleküle geringerer Kohlenstoffatomzahl) und durch Wasserstoffanlagerung in Verbindungen verwandelt, die bei Normaltemperatur flüssig sind. Daraus folgt die durch die Erfahrung bestätigte Tatsache, daß die Öle aus der Hochhydrierung der Steinkohle sich bezüglich Zündwilligkeit ähnlich verhalten wie die Steinkohlenteeröle.

Hier hat nun die Steinkohlenschwelung eine Bedeutung, die neben ihren sonstigen Vorteilen nicht übersehen werden soll. Da sie mit Temperaturen von 500 bis 600° C arbeitet, wird ein größerer Anteil der Kohlenwertstoffe vor der pyrolytischen Aufspaltung in Koks- und Wasserstoff bewahrt. Es ist daher nicht nur die Gesamtausbeute an flüssigen Kraftstoffen, bezogen auf die eingesetzte Kohlenmenge, größer, sondern die dabei gewonnenen Teere enthalten größere Mengen von aliphatischen und naphthenischen Verbindungen, die an sich zündwilliger als die Aromaten sind. Eine direkte Verwendung der unbehandelten Schwelteere im Dieselmotor stößt allerdings meist auf Schwierigkeiten, weil die in ihnen enthaltenen Phenole die Zündwilligkeit beeinträchtigen und vorher entfernt werden müssen.<sup>7)</sup>

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den aus Braunkohle gewonnenen Schwelteeren. Auch die enthalten gewisse Mengen von Aliphaten, jedoch wegen des geringeren geologischen Alters der Braunkohle erhebliche Mengen sauerstoffhaltiger Verbindungen, so daß sie vor der Verwendung im Verbrennungsmotor zweckmäßig durch Hydrierung behandelt werden.

Gerade umgekehrt wie mit der Zündwilligkeit verhält es sich mit der Klopfestigkeit. Benzine, die durch einfache De-

<sup>7)</sup> Zu den Phenolen gehören im weiteren Sinne das Hydroxylbenzol  $C_6H_5 \cdot OH$  (Carbolsäure, auch als Phenol im engeren Sinne bezeichnet), die drei Kresole (Methylphenole)  $C_6H_4 \cdot OH_2 \cdot OH$ , die Dioxybenzole  $C_6H_4 \cdot (OH)_2$  und die Nylenole  $C_6H_3(CH_3)_2 \cdot OH$ , durchwegs Verbindungen, die vom Benzol abgeleitet sind und in dem angelagerten Hydroxylgruppen Sauerstoff enthalten. Da das Phenol nicht nur im Kraftstoff einerseits unerwünscht, sondern andererseits als Ausgangsstoff für die Herstellung von Kunststoffen sehr begehrt ist, ist seine Gewinnung von großem Interesse.

- 38 -

stillation gewonnen sind (sog. straight-run-benzine) sind besonders dann, wenn sie aus paraffinbasischen Erdölen gewonnen werden, sehr kloppfreudig, weil die kettenförmigen Kohlenwasserstoffe dem Angriff des Sauerstoffes den geringsten Widerstand entgegensetzen. Allerdings nimmt diese Eigenschaft mit der Kettenlänge im Bereiche kleiner Kohlenstoffatomzahlen sehr stark ab und die niedrigsten Glieder der Paraffinreihe sind sehr kloppfest (s. hierzu auch Abb. 17). Es ist daher verständlich, daß man als Standardkraftstoff für die Ermittlung der Kloppfestigkeit das im Abschnitt a bereits erwähnte n-Heptan  $\text{CH}_3 \cdot (\text{CH}_2)_5 \cdot \text{CH}_3$  mit einem Siedepunkt von  $98,4^\circ \text{C}$  wählte und ihm die Kloppfestigkeit null, in Oktanzahlen ausgedrückt, beilegte. Das als besonders kloppfest angesehene Oktan, der zweite Standardkraftstoff, ist jedoch nicht das n-Oktan, sondern eines der Isooktane, und zwar das schon früher genannte 2,2,4-Trimethylpentan. Sinngemäß wie bei der Zündwilligkeit kennzeichnet man die Kloppfestigkeit eines Ottokraftstoffes durch die Oktanzahl x, wenn er sich ebenso verhält, wie ein Gemisch aus x Volum-% Iso-Oktan und  $(100 - x)$  Volum-% n-Heptan. Mit dieser Definition ist auch für die Ermittlung der Kloppfestigkeit von Gemischen ein additives Gesetz festgelegt. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß es nicht allgemein gilt, wie dies bei der in Zetanzahlen ausgedrückten Zündwilligkeit der Dieselmotorkraftstoffe der Fall ist. Auch hierin kommt zur Geltung, daß es sich dort um einen im Verhältnis einfacheren chemisch-physikalischen Vorgang handelt, beim Klopfen jedoch zahlreiche, nicht ohne weiteres zu durchschauende Einflüsse eine erhebliche Rolle spielen. Es ergeben sich bei der Mischung von Ottokraftstoffen verschiedener Kloppfestigkeit Abweichungen nach oben und nach unten, d.h. der durch Mischen hergestellte Kraftstoff kann Oktanzahlen aufweisen, die über und unter den aus den Komponenten additiv zu errechnenden Werten liegen.

Um nun bei der Mischung nicht immer auf die Untersuchung im Prüfmotor angewiesen zu sein, hat man für einfache, definierte Kraftstoffe, wie Isooktan und Benzol, aber auch für



- 39 -

Polymerbenzine, die sich zur Klopfwertverbesserung besonders eignen, sogenannte Misch-Oktanwerte ermittelt. Diese liegen bei Iso-Oktan und Benzol bis zu 10 bzw. 13 Einheiten unter den Oktanzahlen der reinen Zusatzstoffe von 100 bzw. 97. Die Misch-Oktanwerte müssen in die Rechnung eingesetzt werden, um richtige Oktanzahlen des gemischten Kraftstoffes zu erhalten. Sie ändern sich sowohl mit dem Anteil des zuzumischenden Klopfwertverbesserers als auch mit dem ursprünglichen Klopfwert des zu verbessernden Kraftstoffes. Bei dem noch zu erwähnenden Polymerbenzin liegen die Oktanwerte hingegen weit über der Oktanzahl des unvermischten Kraftstoffes, die etwa 81 beträgt.

Eine Erklärung hierfür läßt sich geben, wenn man berücksichtigt, daß es sich bei der Zündung von Kohlenwasserstoff-Luft-Gemisch um Kettenreaktionen handelt. Jene Kohlenwasserstoffe oder Gemische werden demnach klopfest sein, bei denen die sich bildenden Zerfallsprodukte zum Abbruch der Reaktionskette führen. Dadurch muß die Zündung immer wieder von neuem anlaufen und das plötzliche Entflammen des gesamten Verbrennungsraum Inhaltes wird dadurch verhindert. Wenn man also zwei Kraftstoffe verschiedener Klopfestigkeit miteinander mischt, so wird jene Komponente, die die Bildung von Reaktionsketten und damit das Klopfen fördert, in entsprechendem Verhältnis verdünnt. Wenn sich dann die Zerfallsprodukte der letzten Komponenten nicht gegenseitig beeinflussen, oder richtiger ausgedrückt, quantitativ in gleicher Weise beeinflussen wie dies bei einer Mischung aus n-Heptan und i-Oktan der Fall ist, so gilt für die Ermittlung der Oktanzahl ein additives Gesetz; die Mischoktanwerte sind dann gleich denen der unvermischten Komponenten.

In dem Maße aber, in dem sich durch die eine zugemischte Komponente ein Einfluß auf den Reaktionsverlauf der anderen geltend macht, entstehen Abweichungen vom additiven Gesetz und der Mischoktanwert ändert sich. Man muß daher annehmen, daß die kettenabbrechende Wirkung der in Polymerbenzinen vorkommenden Olefine bei der Oxydation der Moleküle der aufzubessernden

- 40 -

Kraftstoffe sehr stark zur Geltung und dadurch die hohe Misch-Oktananzahl von Polymerbenzinen zustande kommt.

Diese Zusammenhänge lassen sich graphisch darstellen, wenn man das ursprünglich von Ricardo als Maß der Klopfestigkeit benutzte höchste nutzbare Verdichtungsverhältnis über dem am besten in Kolenbruchzahlen ausgedrückten Mischungsverhältnis der beiden Komponenten aufträgt. Nach dieser Darstellung verläuft die Linie für eine Mischung aus n-Heptan und i-Oktan als nach oben konvexe Kurve, anfangs nur wenig, mit zunehmendem Gehalt an Iso-Oktan stärker ansteigend.

Gleiche Änderungen des i-Oktangehaltes wirken sich also bei niedrigem Gehalt wesentlich schwächer aus als bei höherem. In Abb. 15 sind solche Kurven nach Lovell, Campbell und Boyd wiedergegeben [22] und [6, S. 554]. Es fällt allerdings auf, daß die Kurven für Benzol einem Grenzwert zustreben, der im Widerspruch zu dem sonst bekannten, in Oktananzahlen ausgedrückten Wert für die Klopfestigkeit von Benzol steht. Mögen somit die Kurven auch quantitativ nicht stimmen, so sind sie immerhin geeignet, die Zusammenhänge klar zu machen, auf die es hier ankommt. Es müssen danach für Mischungen, für die ein additives Gesetz gilt, die Kurven so verlaufen, daß die Tangenten für Punkte gleichen Wertes von  $\epsilon_{\max}$  affin zueinander liegen. Dies ist schematisch in Abb. 16 dargestellt, worin die Kurve a den Verlauf für die Standardmischung aus n-Heptan (H) und i-Oktan (O) darstellt. Das additive Gesetz gilt dann, wenn sich die Verhältnisse für zwei andere Komponenten A und B durch Kurve b wiedergeben lassen. Wenn jedoch die tatsächlich zu erzielenden höchsten nutzbaren Verdichtungsverhältnisse durch eine Linie ähnlich der Kurve c dargestellt werden, so heißt das, daß der Misch-Oktanwert der Komponente B niedriger ist, als die in Oktananzahlen ausgedrückte Klopfestigkeit der reinen Komponente B. Dieser Wert wird erst im Grenzfall für B = 100 % erreicht. Gilt jedoch eine Kurve nach der Art der Linie d, so liegen die Verhältnisse umgekehrt. Es lassen sich geometrische Beziehungen ableiten, durch die bei gegebenem Kurvenverlauf die Mischoktan-



- 41 -

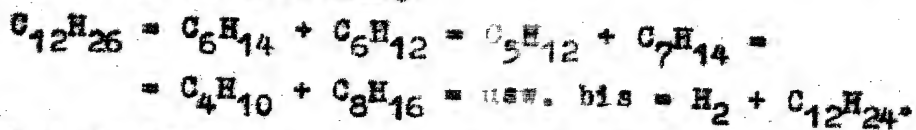
zahlen, die sich von Punkt zu Punkt ändern, mit Hilfe von Tangenten zeichnerisch ermittelt werden können. Verhältnisse, wie sie durch Kurve d dargestellt sind, bei denen also im Bereiche kleinster Zumischung der klopfesten Komponente extrem hohe Mischoktanzahlen gelten, werden im Abschnitt 5 bei den Gegenklopfmitteln noch näher zu besprechen sein.

Die für Benzol mit 97 angegebene Oktanzahl kennzeichnet dieses als sehr klopfesten Ottokraftstoff und deckt sich mit der bereits wiederholt hervorgehobenen Tatsache, daß die Aromaten als reaktionsträge anzusehen sind. Sie haben jedoch als Ottokraftstoffe trotz ihrer hervorragenden Klopfestigkeit deshalb praktisch keine erhebliche Bedeutung, weil sie in der Hauptsache nur als Nebenprodukte der Hochtemperaturverkokung der Steinkohle in beschränkter Menge gewonnen werden. Diese Mengen müssen außerdem den Bedarf für andere Zwecke (Lösungsmittel, Sprengstoffe usw.) decken.

Zur Gewinnung klopfester Kraftstoffe steht jedoch heute eine Anzahl von Verfahren zur Verfügung, durch die zwar keine Aromaten, sondern vorzugsweise Olefine und Isoparaffine gewonnen werden. Von diesen haben sich aber die meisten als sehr klopfest erwiesen. Es muß daher der Einfluß von Verzweigungen und Doppelbindungen näher betrachtet werden. Bei Ottokraftstoffen kommt dieser Einfluß deshalb stärker zur Geltung, weil hierfür die niedrig siedenden Kohlenwasserstoffe oder Gemische daraus verwendet werden. Bei solchen niedrig-molekularen Verbindungen fallen Doppelbindungen oder Verzweigungen oder beides zugleich schon bei geringer Anzahl für die Eigenschaften des Kraftstoffes erheblich ins Gewicht. Bei den Dieselmotorkraftstoffen mit wesentlich höheren Siedebereich, die aus Kohlenwasserstoffen mit rd. 15 und mehr Kohlenstoffatomen bestehen, müßten Verzweigungen und Doppelbindungen in weit größerer Anzahl vorhanden sein, als dies bei den vorkommenden Kraftstoffen der Fall ist, um das Verhalten im Motor merkbar zu beeinflussen. Es sind also auch in dieser Hinsicht die Verhältnisse beim Dieselmotor übersichtlicher als beim Ottomotor, weil es dort für

die Zündwilligkeit im wesentlichen nur auf das Verhältnis der kettenförmigen zu den ringförmigen Anteilen ankommt.

Olefine finden sich in geringer Menge schon in den natürlich vorkommenden Erdölen. Bei der Verarbeitung werden sie in größerer Menge gebildet, und zwar durch das Kracken hochmolekularer Kohlenwasserstoffe. Veranlassung zu der Einführung des Krackverfahrens in der Erdölindustrie war dadurch gegeben, daß die durch einfache Destillation aus dem geförderten Rohöl gewonnenen Fraktionen einen sehr unterschiedlichen Marktwert hatten. Der schon vor dem ersten Weltkrieg stark ansteigende Verbrauch an Motorkraftstoffen hatte zur Folge, daß bei dem damals üblichen Verfahren große Mengen höher siedender Fraktionen mit erzeugt werden mußten, für die keine rechte Verwendung bestand. Der dadurch bedingte niedrige Preis der Gasölfraktionen war bekanntlich neben dem guten Wirkungsgrad ein wesentlicher Umstand, der das Vordringen des Dieselmotors begünstigte. In dieser Zwangslage war für die Erdölindustrie die Entdeckung des Krackverfahrens äußerst willkommen, durch das es gelang, aus höher siedenden, schlecht absetzbaren Erdöldestillaten Benzine zu gewinnen. Wählt man Druck und Temperatur des Verfahrens passend, so kann die pyrogene Zersetzung der hochmolekularen Verbindung durch das Kracken in bestimmte Bahnen gelenkt werden. Dabei kann mit oder ohne Katalysatoren gearbeitet werden. Es gibt heute eine sehr große Zahl von Verfahrensvorschriften und Patenten, die hier nicht näher besprochen werden können [23]. Allen gemeinsam ist als Arbeitstemperatur ein Bereich zwischen 400 und 500° C. Der Druck wird verschieden gewählt. Ebenso bestehen Unterschiede darin, ob das Kracken in flüssiger, dampfförmiger oder in beiden Phasen zugleich durchgeführt wird. Kennzeichnend für den Vorgang ist folgende, für das Dodekan entwickelte Gleichung:



Das Paraffin wird also in ein Paraffin von kleinerer Kettenlänge und in ein Olefin aufgespalten. Eine Temperatursteigerung

- 43 -

bewirkt eine Verschiebung der Spaltstelle an das Ende des Moleküls, hoher Druck bewirkt dagegen, daß die Spaltstücke mehr symmetrisch werden. Für das Kracken kommen wesentlich nur Ausgangsstoffe in Frage, die größtenteils aus kettenförmigen Kohlenwasserstoffen bestehen; Aromaten bleiben wegen ihrer Hitzebeständigkeit - abgesehen von etwa vorhandenen Seitenketten - im allgemeinen unverändert. Naphthene werden beim Kracken meist ihres Wasserstoffes beraubt und zu Aromaten oder zu Zwischengliedern zwischen diesen und den Naphthenen dehydriert.

Die Klopfestigkeit der durch Kracken gewonnenen Benzine ist darauf zurückzuführen, daß sich der Vorgang in erster Linie auf Kosten der klopfreudigen Anteile abspielt und das Krackbenzin für die Verbrennung im Motor gewissermaßen vorbehandelt ist. Wie die Klopfestigkeit von Normal- und Isoparaffinen gesteigert wird, wenn das Kohlenstoffgerüst Doppel- und dreifache Bindungen enthält, zeigt Abb. 17.

Die Tatsache der Klopfestigkeit der Olefine scheint im Widerspruch zu der sonst bekannten Reaktionsfähigkeit der Olefine zu stehen; es ist jedoch zu beachten, daß die Beständigkeit der Olefine erst bei verhältnismäßig hohen Temperaturen die der zugehörigen Paraffine überwiegt. In diesem Bereich ist aber ihr Verhalten für die Klopfestigkeit von Bedeutung. Diese Zusammenhänge lassen sich erkennen, wenn man als Maßstab der thermischen Beständigkeit von Kohlenwasserstoffen die freie Bildungsenergie betrachtet, die zum Aufbau der Verbindung aus den Elementen  $C_{fest}$  und  $H_{2gas}$  benötigt wird. Je kleiner diese bei einer bestimmten Temperatur ist, desto beständiger ist die betreffende Verbindung. Es läßt sich daher aus Abb. 18, das die freie Bildungsenergie einiger Kohlenwasserstoffe nach Francis wiedergibt [24], erkennen, daß die Werte für die Paraffine am steilsten verlaufen, diese also mit steigender Temperatur am unbeständigsten sind, während sich Benzol und Toluol abgesehen von dem als Kraftstoff nicht in Frage kommenden Naphthalin am günstigsten verhalten. Zwar ergibt sich danach, daß Aromaten im Bereiche niedriger Temperaturen thermodynamisch

- 44 -

unbeständig sind, doch ist die Zerfallsgeschwindigkeit so gering, daß sie praktisch keine Rolle spielt.

Zu gleichen Ergebnissen kommt man selbstverständlich, wenn man aus der freien Bildungsenergie die Konstante für das Bildungsgleichgewicht errechnet, wie dies G. B. Schultze getan hat [25]. Daran läßt sich ebenfalls das gegensätzliche Verhalten der Paraffine und der Aromaten und die Zwischenstellung der Olefine und Naphthene erkennen.

Auch die sonstigen Beobachtungen decken sich mit der Erfahrung, daß die Klopfestigkeit von den Aromaten über die Naphthene und Olefine zu den Paraffinen abnimmt. So können die in Abschnitt I 2 b erwähnten Luminiszenzen und kalten Flammen bei um so niedrigeren Temperaturen beobachtet werden, je geringer die Klopfestigkeit der betreffenden Verbindung ist; bei Benzol sind sie überhaupt nicht festzustellen. Eine bemerkenswerte Erklärung für die wesentlich höhere Klopfestigkeit der Olefine gegenüber den entsprechenden Paraffinen läßt sich mit Hilfe der sogenannten Doppelbindungsregel von C. Schmidt geben [26]. Nach dieser Regel, die sich elektronentheoretisch begründen läßt, ist in Molekülen mit Doppelbindungen ein Wechsel von starker und schwacher Bindung abnehmender Intensität in der C-C-Kette festzustellen. Man kann deshalb annehmen, daß Olefine wohl an ihrer schwächsten Stelle aufgespalten werden, daß aber durch die in der benachbarten C-C-Bindung vorhandene Verstärkung sehr stabile Radikale entstehen, die reaktionsträge sind und dadurch den Verlauf der Kettenreaktionen im Sinne einer Erhöhung der Klopfestigkeit beeinflussen.

Das Kracken verläuft nicht ohne begleitende Nebenreaktionen, durch die Koks und Gas entstehen. Dies erklärt sich aus der Gleichung für den Krackvorgang bei stark unsymmetrischer Spaltung. Das Krackgas besteht in der Hauptsache aus Paraffinen und Olefinen mit einem bis vier Kohlenstoffatomen. Mit diesen Gasen schlägt man nun, in dem Streben, zusätzliche Kraftstoffmengen für den Betrieb von Ottomotoren zu gewinnen, den umgekehrten Weg ein.



- 45 -

Durch geeignete Wahl von Temperatur und Katalysatoren gelingt es, aus Molekülen ungesättigter Kohlenwasserstoffe Moleküle höheren Molekulargewichtes aufzubauen. Es werden dabei die ungesättigten Bindungen der einzelnen Bausteine gegenseitig abgesättigt. Dieser Vorgang wird in der Erdöltechnik Polymerisation genannt.<sup>8)</sup>

Da die Krackgase beträchtliche Mengen von ungesättigten Kohlenwasserstoffen enthalten, eignen sie sich besonders als Ausgangsstoff für Polymerisationsbenzin (Polymerbenzin). Auch hier gibt es eine sehr große Zahl von Verfahren, die sich auf gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe anwenden lassen. Gesättigte Kohlenwasserstoffe müssen erst gespalten oder dehydriert werden, um sie für die Polymerisation reif zu machen. Doch gibt es auch Verfahren, bei denen gesättigte Kohlenwasserstoffe unverändert bleiben und mit ungesättigten kondensiert werden. Dieser Vorgang ist als Alkylierung bekannt, weil in der Hauptsache Alkyle angelagert werden. Dabei gelingt es, Kohlenwasserstoffe mit Verzweigungen zu erhalten, wodurch die Klopfestigkeit der so hergestellten Benzine wesentlich erhöht wird. Eine Gesetzmäßigkeit der Zusammenhänge läßt sich nicht angeben, doch zeigt Abb. 19 die Abhängigkeit des kritischen Verdichtungsverhältnisses von der Kohlenstoffatomzahl je Molekül für eine Anzahl von verzweigten und unverzweigten Paraffinen. Das kritische Verdichtungsverhältnis und damit die Klopfestigkeit sind im allgemeinen um so größer, je größer die Zahl der Seitenketten ist.

Bei der Wahl der Arbeitsbedingungen für die Gewinnung von Polymerbenzinen ist man darauf bedacht, möglichst klopfeste Benzine, insbesondere reines Isooktan zu gewinnen. Dies ist z.B., ausgehend von den Abgasen von Stabilisierungsanlagen, für Krackbenzin möglich. Dort werden hauptsächlich Butan und Butene

<sup>8)</sup> Tatsächlich handelt es sich aber um eine Kondensation in der Ausdrucksweise der Chemiker, denn es werden neue C-C-Bindungen hergestellt. Unter Polymerisation verstehen die Chemiker hingegen Molekülzusammenlagerungen, die leicht wieder rückgängig gemacht werden können. Dies ist z.B. vielfach bei Sauerstoff als verbindendem Glied, nicht aber bei zwei Kohlenstoffatomen der Fall.

wegen ihres niedrigen Siedepunktes aus dem Krackbenzin entfernt, um einen Kraftstoff von genügend niedrigem Dampfdruck zu erhalten. Durch Polymerisation erhält man daraus eine Mischung von 2,2,4-Trimethylpenten-3, und 2,2,4-Trimethylpenten-4. Durch Hydrieren können diese in das entsprechende, gesättigte Iso-Oktan umgewandelt werden. Da es bei einem Siedepunkt von 99,5° C für den praktischen Betrieb eine etwas zu niedrige Flüchtigkeit aufweist, wird ihm zur Bereitung hochwertiger Fliegerkraftstoffe auf ähnliche Weise gewonnenes Isopentan, das ebenfalls sehr klopfest ist und einen Siedepunkt von 28° C besitzt, beigemischt. Es würde zu weit führen, auf die zahlreichen Verfahren einzugehen, nach denen heute durch Polymerisation klopfeste Kraftstoffe gewonnen werden können. Die Grundgedanken dürften aus dem Vorstehenden zu erkennen sein. Es soll nur noch darauf hingewiesen werden, daß es auch pyrolytisch arbeitende Verfahren gibt, bei denen hauptsächlich Aromaten aus olefinischen und paraffinischen Gasen gewonnen werden können [27].

Diese Aromatisierung ist nicht nur für die weiterverarbeitenden Verfahren der Erdölindustrie von Bedeutung, sondern auch im Anschluß an die Synthese nach Fischer-Tropsch, um die bei diesem Verfahren anfallenden, wegen ihres aliphatischen Charakters sehr klopfreudigen Leichtöle in solche mit besseren Eigenschaften für die Verwendung im Ottomotor zu verwandeln. Diesbezügliche Untersuchungen wurden von H. Koch durchgeführt [28]. Dabei zeigt sich, daß die Umwandlung teilweise ohne Spaltung durch Ringbildung der Ketten vor sich geht. Als Ausgangsstoff für dieses Verfahren sind besonders solche Kogesine geeignet, die einen höheren Anteil an Olefinen haben, was durch Wahl der Arbeitsbedingungen erreicht werden kann.

Es wurde schon im Zusammenhang mit der Gewinnung von Dieselmotorkraftstoffen auf die Hydrierung, die Hochtemperaturverkokung der Steinkohle und die Schwelung der Stein- und Braunkohle hingewiesen. Dabei wurde festgestellt, daß im Gegensatz zur Synthese nach Fischer-Tropsch keines dieser Verfahren geeignet



- 47 -

ist, ohne weiteres hochwertige Dieselkraftstoffe zu liefern. Der Grund hierfür wurde darin erkannt, daß die so gewonnenen Erzeugnisse entweder zum größeren Teil aus Aromaten bestehen oder wegen der ungünstig wirkenden Begleitstoffe zumindest einer Aufarbeitung bedürfen. Ihr Gehalt an Aromaten oder Olefinen macht sie aber zu vorteilhaften Ausgangsstoffen für die Gewinnung von Ottokraftstoffen. Sie können nur wegen des meist hohen Siedebereichs nicht unverarbeitet verwendet werden. Die durch Destillation abtrennbaren Benzine sind meist ziemlich klopfest, ihr Anteil ist jedoch verhältnismäßig gering, beim Hochtemperaturteer der Steinkohle praktisch gleich Null. Durch Hydrieren wird nicht nur der Wasserstoffgehalt erhöht, es werden dabei auch die Moleküle durch Spaltung verkleinert, so daß man Fraktionen mit niedrigerem Siedebereich erhält und so sehr klopfeste Benzine erzeugen kann.

Da aber die bei hoher Temperatur zu verkokende Steinkohlennmenge durch den Bedarf der Eisengewinnung und anderer metallurgischer Verfahren bestimmt wird, mag noch kurz darauf hingewiesen werden, daß es nicht an Versuchen gefehlt hat, die Ausbeute an flüssigen Kraftstoffen dabei zu erhöhen. Durchläuft doch die zu verkokende Kohle auch bei der Hochtemperaturverkokung jene Temperaturbereiche, die bei der Schmelzung angewendet werden. Die dabei entweichenden Gase und Dämpfe werden erst durch die Berührung mit den glühenden Kammerwänden oder die bereits glühende Kokeschicht zersetzt. Man hat daher versucht, durch Innenabsaugung der Destillationsgase und Dämpfe aus der zwischen den Teernähten noch unzersetzten Kohlschicht die Ausbeute an flüssigem Kraftstoff zu erhöhen [29]. Es gelang auf diese Weise, ein Teeröl zu gewinnen, das dem Schmelzteer ähnlich ist und wesentlich mehr Nichtaromaten enthält als das Hochtemperaturteeröl. Die durch Hydrierung daraus hergestellten Endzeugnisse ergeben in den höher siedenden Fraktionen Dieselöle, die bezüglich Zündwilligkeit üblichen Gasölen durchaus gleichwertig sind; aber auch die niedrig siedenden Fraktionen sind wegen des noch beträchtlichen Anteils an Aromaten

- 48 -

sehr kloppfest.

Aus allem ergibt sich die immer wieder betonte Gegenläufigkeit der Eigenschaften von Kraftstoffen in Bezug auf Kloppfestigkeit und Zündwilligkeit. Sie geht so weit, daß es möglich ist, das gegenseitige Verhältnis durch eine einfache Gleichung wiederzugeben, wie sie vom technischen Prüfstand der I. G. Farbenindustrie AG. ermittelt wurde [30]. Danach ist mit genügender Genauigkeit für einen bestimmten Kraftstoff

Oktanzahl = 120 - 2 mal Zetanzahl                      und

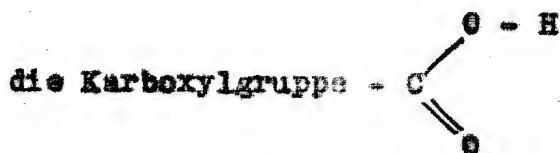
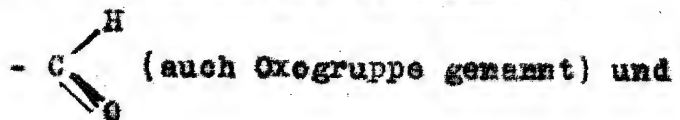
Zetanzahl = 60 - 0,5 mal Oktanzahl.

#### o. Die Bedeutung sauerstoffhaltiger Kohlenwasserstoffabkömmlinge

In der organischen Chemie spielen jene Gruppen von Verbindungen eine sehr große Rolle, in denen ein oder mehrere Wasserstoffatome der im Abschnitt a beschriebenen Hauptgruppen durch sog. funktionelle Gruppen ersetzt sind. Unter diesen sind wiederum für den Aufbau der gesamten organischen Welt jene die wichtigsten, die Sauerstoff enthalten und zwar:

die Hydroxylgruppe - OH (auch Oxygruppe genannt),

die Karbonylgruppe



Die dabei entstehenden Verbindungen sind im ersteren Falle die Alkohole, wenn sie von kettenförmigen, und die Phenole, wenn sie von ringförmigen Kohlenwasserstoffen abgeleitet werden können. Verbindungen mit einer Karbonylgruppe nennt man Aldehyde, deren einfachster Vertreter der im Abschnitt I 2 b als Zerfallsprodukt bei klopfender Verbrennung festgestellte Formaldehyd HCOH ist. Sitzt der Sauerstoff nicht an einem endständigen Kohlenstoffatom, das dann als primär bezeichnet wird,

- 49 -

sondern an einem in der C-C-C-Kette, so nennt man eine solche allgemein  $R^{(1)} - \underset{\text{O}}{\underset{||}{\text{C}}} - R^{(2)}$  geschriebene Verbindung einen Keton.

Auch diese spielen in dem hier zu erörternden Zusammenhang eine gewisse Rolle, doch würde es zu weit führen, auf diese Einzelheiten einzugehen.

Die die Karboxylgruppen enthaltenden organischen Säuren und insbesondere die von ihnen abgeleiteten Glycerinester, nämlich die Öle und Fette, sind für das Leben der organischen Natur, höchstwahrscheinlich auch als Ausgangsstoffe der Erdölbildung von großer Bedeutung; in Kraftstoffen sind sie aber wegen ihres sauren Charakters höchstens unerwünschte Begleitstoffe. Praktisch kommen für den Betrieb von Motoren nur die von den beiden ersten Gliedern der Paraffinreihe abgeleiteten Alkohole, nämlich der Methylalkohol  $\text{C}_2\text{H}_5 \cdot \text{OH}$  und der Äthylalkohol  $\text{C}_2\text{H}_5 \cdot \text{OH}$  in Frage.<sup>9)</sup> Die beiden genannten Alkohole sind sehr klopfest, ihre Oktanzahl beträgt nahezu 100. Bei ihrer Oxydation sind Lumineszenz und kalte Flammen erst bei höheren Temperaturen zu beobachten als bei den in Ottokraftstoffen vorkommenden Paraffinen ungefähr gleichen Siedepunktes, jedoch höherer Kohlenstoffatomzahl. Dies deckt sich mit ihrer in Oktanzahlen ausgedrückten Bewertung. Gegenüber den als sehr klopfest anzusehenden beiden Paraffinen gleicher Kohlenstoffatomzahl, nämlich Methan und Äthan, liegen jedoch ihre Werte etwas niedriger.

Beide Alkohole wurden bisher in Deutschland viel in Mischung mit Benzin als Ottokraftstoffe verwendet. Der Äthylalkohol wurde meist durch alkoholische Gärung hergestellt; als Ausgangsstoff diente in großem Umfang die Stärke von Kartoffeln, in geringem Maße auch durch Verzuckerung von Holz nach

<sup>9)</sup> Es mag hier kurz darauf hingewiesen werden, daß Alkohole keine Dissoziation zeigen und die für sie kennzeichnende Hydroxylgruppe bei ihnen nicht dieselbe Rolle spielt, wie in wässrigen Lösungen, wo sie als Anion den basischen Charakter verursacht.

- 50 -

den Verfahren von Scholler gewonnene wässrige Zuckerlösung (Würze). Weiterhin hat erhebliche Bedeutung die Gewinnung von Alkoholen aus den Abfällen von Sulfitzellstoff-Fabriken.

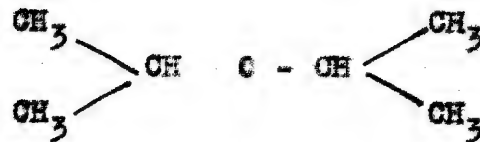
Der Methylalkohol (Methanol) wurde in großen Mengen durch katalytische Synthese aus Kohlenoxyd und Wasserstoff gewonnen. Dieses Verfahren, das seit 1923 im Großbetrieb angewendet wird, kann als Vorläufer der Benzinsynthese nach Fischer-Tropsch angesehen werden. In den Vereinigten Staaten von Amerika entnimmt man die Ausgangsgase dem reichlich vorhandenen Naturgas und stellt das richtige Verhältnis von Kohlenoxyd zu Wasserstoff ähnlich wie bei Verwendung von Generatorgas durch Konvertierung mit Wasserdampf her. Diesen Verfahren gegenüber sind die sonstigen Gewinnungsverfahren, wie die aus dem bei der Holzverkohlung erhaltenen Holzeisig von untergeordneter Bedeutung.

Unter Benutzung des in Fußnote <sup>3)</sup> eingeführten Zeichens R für ein beliebiges Radikal kann man die Formel für die Alkohole allgemein mit  $R - O - H$  schreiben. Man sieht daran die strukturelle Verwandtschaft mit dem Wasser, das als  $H - O - H$  dargestellt werden kann und mit dem die an Kohlenstoffatomen ärmsten Glieder der Alkoholreihe auch größere Ähnlichkeit aufweisen als mit den entsprechenden Gliedern der Kohlenwasserstoffe; dies trifft mindestens für die Zähigkeit, die Oberflächenspannung und den Siedepunkt zu. Die von Kohlenwasserstoffen mit mehreren Kohlenstoffatomen abgeleiteten Alkohole sowie die mehrwertigen Alkohole - solche mit mehreren Hydroxylgruppen - , zu denen Glyzerin gehört, weisen hingegen wesentlich größere Ähnlichkeit mit den öligen Verbindungen unter den Kohlenwasserstoffen auf.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß in der Systematik der organischen Chemie von den Alkoholen leicht die Verbindung zu den Äthern mit der allgemeinen Strukturformel  $R^{(1)} - O - R^{(2)}$  hergestellt werden kann. In den Vereinigten Staaten von Amerika hat der Diisopropyläther



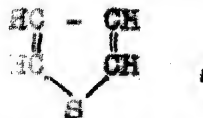
- 51 -



als Zusatz zur Erhöhung der Klopfestigkeit ziemlich Bedeutung erlangt. Dies hat zum Teil darin seinen Grund, daß er wesentlich billiger hergestellt werden kann, als Iso-Oktan oder Isopentan. Deren klopfverbessernde Wirkung übertrifft er, weil seine Misch-Oktanzahl etwa bei 110 liegt, wie aus Abb. 20 zu ersehen ist.

Die hohe Klopfestigkeit dieses Äthers erscheint bei Berücksichtigung seiner Struktur verständlich. Die Kupplung der beiden Isopropylradikale durch den Sauerstoff ist ziemlich lose; die beiden Molekülhälften sind dadurch wie bei allen Äthern gegeneinander leicht beweglich, was ein Grund für die bekannte Flüchtigkeit dieser Verbindungsgruppen ist. Durch Sauerstoffangriff zerfällt daher der Isopropyläther höchstwahrscheinlich in die beiden Radikale, die vermutlich ähnlich klopfest sind wie das Propan, dessen Klopfestigkeit mit über 125 angegeben wird.

Es mögen noch einige Worte über den Einfluß des Schwefels gesagt werden. Er kann fast in allen einfachen funktionellen Gruppen den Sauerstoff ersetzen. Dadurch entstehen Schwefelalkohole (Merkaptane), Schwefeläther (auch Thioäther genannt) usw. Weiterhin erscheint er kernsubstituiert in dem bei der Hochtemperatur-Entgasung der Steinkohle entstehenden Thiophen von der Strukturformel



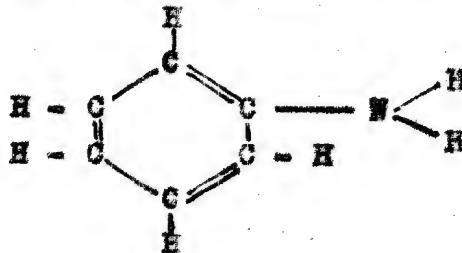
dessen Siedepunkt nur 3,6° C über dem des Benzols liegt. Es kann daher von diesen durch fraktionierte Destillation kaum getrennt werden. Es entsteht, wie andere ähnliche Begleitstoffe, bei der Hochtemperatur-Entgasung aus dem Schwefelgehalt der Kohle. Auch aus Erdöl gewonnene Kraftstoffe enthalten je nach dem Rohöl kleine Mengen Schwefel. Abgesehen von den

sonstigen unangenehmen Eigenschaften (wie schlechtem Geruch, Werkstoffangriff bei der Lagerung und durch Schwefeldioxydbildung in den Verbrennungsgasen) fördert der Schwefel das Klopfen. Seine Aktivität beim Ablauf der Reaktionsketten findet eine Parallele in der Grenzflächenaktivität, die bei den sog. Compound-Schmiermitteln für besonders hohe Beanspruchungen technisch genutzt wird.

### 5. Gegenklopfmittel und Zündbeschleuniger

Es wurde schon bei der Besprechung der Mischoktanzahlen darauf hingewiesen, daß es Stoffe gibt, deren Misch-Oktanzahlen besonders im Bereiche kleiner Beimischungen extrem hohe Werte annehmen. Es entspricht dies einem sehr steilen Anstieg der Kurve d an der linken Grenze des Diagramms in Abb. 16. In dieser Weise wirkende Stoffe können bereits als Katalysatoren angesehen werden, obwohl die Grenze zwischen ihnen und den hoch klopfesten Kraftstoff-Komponenten unscharf ist. Die Wirkung dieser Stoffe besteht darin, auch in kleiner Konzentration die angelaufenen Reaktionsketten abubrechen und damit das Entstehen klopfender Verbrennung zu hemmen. Es gibt nach den bisherigen Forschungen zwei Gruppen von solchen Gegenklopfmitteln, und zwar Aminoverbindungen und metallorganische Verbindungen.

Der einfachste Vertreter der hier vornehmlich in Frage kommenden aromatischen Aminoverbindungen ist das Anilin  $C_6H_5 \cdot NH_2$  mit der Strukturformel



In ihr erscheint am Benzolring ein Wasserstoffatom durch die



- 53 -

sogenannte Aminogruppe -  $\text{NH}_2$  ersetzt. Die Wirkung von Anilin auf die Klopfestigkeit ist rund 12mal größer als die von Benzol oder Isooktan und kommt daher bereits bei Zusätzen in der Größenordnung von weniger als 1 % zur Geltung. Man hat seine Wirkung bei der Untersuchung anderer Gegenklopfmittel als Maßstab gewählt und drückt deren Einfluß auf die Klopfestigkeit in sogenannten Anilinäquivalenten aus; d.h. daß von einem Gegenklopfmittel mit dem Anilinäquivalent  $x$  die Menge  $\frac{1}{x}$  Mole je Kraftstoffmengeneinheit erforderlich ist, um die gleiche Wirkung zu erzielen, wie mit einem Mol Anilin. In Zahlentafel 2 ist die Gegenklopfwirkung einiger Aminoverbindungen hauptsächlich nach Lovell, Campbell und Boyd sowie nach Middley und Boyd wiedergegeben [31].

Eine Erklärung für die Wirkung der Aminoverbindungen konnte bisher noch nicht gegeben werden. Der Stickstoff allein ist offensichtlich nicht die Ursache, denn Ammoniak  $\text{NH}_3$  sowie Nitrite und Nitroverbindungen sind als ausgesprochen klopfsteigernd bekannt. Bei den zuletzt genannten bestehen sogar ähnliche Wirkungen wie bei Peroxyden, die jedoch durch die Sauerstoffatome hervorgerufen sein dürften. Rechnet man die Gegenklopfwirkung auf Grammatome Stickstoff um und setzt ihren relativen Betrag für Anilin gleich 1, so ergeben sich abhängig von der Zahl der Kohlenstoffatome je Molekül Zusammenhänge mit ihrer Struktur, wie sie in Abb. 21 wiedergegeben sind. Mögen diese Stoffe auch praktisch von untergeordneter Bedeutung sein, so erscheint es nicht ausgeschlossen, daß eine weitere Durchforschung ihrer Reaktionskinetik Aufschluß über die der klopfenden Verbrennung bringt und damit für die Praxis doch von erheblichem Nutzen sein kann.

Ungleich wirksamer als die Aminoverbindungen sind die metallorganischen, von denen eine größere Anzahl mit Angabe ihrer in Anilinäquivalenten ausgedrückten Gegenklopfwirkung in Zahlentafel 3 zusammengestellt ist. Wie daraus hervorgeht, sind es vor allem Bleiverbindungen (Gruppe IV b des periodischen Systems), dann Verbindungen des ihm im periodischen System be-

- 54 -

nachbarten Wismuts aus der Gruppe V b, weiterhin Verbindungen der beiden in Gruppe VI b stehenden Elemente Selen und Tellur. Sehr wirksam sind auch noch die beiden Carbonyle von Eisen und Nickel aus der Gruppe VIII, von denen das erste <sup>in</sup> Deutschland eine Zeitlang praktische Bedeutung hatte.

Bei der Betrachtung der Zusammenstellung ist es nicht verwunderlich, daß heute fast ausschließlich Bleitetraäthyl (englisch: Tetraethyl lead, abgekürzt TEL bezeichnet) Verwendung findet. Da es giftig ist, muß bei der Verwendung gebleiteter Benzine Vorsicht geübt werden. Es ist eine farblose Flüssigkeit mit einer Wichte von  $1,65 \text{ g/cm}^3$  und einem Siedepunkt von etwa  $200^\circ \text{C}$ , bei dem es sich jedoch schon zu zersetzen beginnt. Ausgangsstoffe für seine Gewinnung sind Blei und Kochsalz. Zu Anfang seiner Verwendung machten sich stärkere Bleioxydablagerungen in den Motoren bemerkbar; man ist deswegen dazu übergegangen, es in Mischung mit Äthylendibromid  $\text{CH}_2\text{Br} - \text{CH}_2\text{Br}$  im Verhältnis zwei Teile Bleitetraäthyl zu einem Teil Äthylendibromid zu verwenden. Äthylendibromid hat eine Wichte von  $2,18 \text{ g/cm}^3$  und einen Siedepunkt von  $131,6^\circ \text{C}$ . Da sein Schmelzpunkt bei  $10^\circ \text{C}$  liegt, wird es in Fällen, in denen gebleite Kraftstoffe bei tiefen Außentemperaturen verwendet werden sollen, teilweise durch Äthylendichlorid ( $\text{CH}_2\text{Cl} - \text{CH}_2\text{Cl}$ ) ersetzt. Dieses hat eine Wichte von  $1,26 \text{ g/cm}^3$ , einen Schmelzpunkt von  $-35,3^\circ \text{C}$  und einen Siedepunkt von  $83,7^\circ \text{C}$ . Beide Äthylenhalogenide bewirken, daß sich das Bleioxyd zu flüchtigem Bleibromid und -chlorid umsetzt und dadurch die Ablagerungen vermieden werden.

Man nimmt heute an, daß die Wirkung der metallorganischen Verbindungen nur dann zustande kommt, wenn das Metall möglichst oxydierend und in feiner, molekulardisperser Verteilung auf das verbrennende Kraftstoffdampf-Luft-Gemisch einwirken kann. Auch besitzen die Metalle, deren Verbindungen wirksame Klopfverbesserer sind, durchwegs zwei Oxydationsstufen, so daß die Annahme berechtigt erscheint, diese Tatsache als Voraussetzung für Klopfverbesserung anzusehen. Dadurch, daß die Metallatome während der Verbrennung erhalten bleiben und ihre kettenabbrechende

Wirkung nicht beeinträchtigt wird, erklärt sich wohl ihre wesentliche größere Wirksamkeit gegenüber den Aminoverbindungen, die durch die Verbrennung vollkommen zerstört werden.

Die Zumischung von Bleitetraäthyl verändert die Klopfestigkeit der einzelnen Kohlenwasserstoffgruppen recht verschieden. Zunächst einmal ist seine klopfverbessernde Wirkung ganz allgemein um so größer, je klopfreudiger ein Kohlenwasserstoff ist; denn die Gelegenheit, die Reaktionsketten abubrechen, ist dann am größten. Die sogenannte Bleiempfindlichkeit ist daher, grob gesprochen, bei Paraffinen größer als bei reinen Aromaten. Es zeigt sich jedoch, daß auch die Olefine trotz ihrer an sich besseren Klopfestigkeit sehr bleiempfindlich sind, und zwar um so mehr, je mehr Verzweigungen sie aufweisen und je näher die Doppelverbindung in der Mitte des Moleküls ist. Dies läßt sich so erklären, daß beim Zerfall der Moleküle um so kompaktere Radikale übrig bleiben, deren schneller Abbau durch das anwesende Gegenklopfmittel kräftig gehemmt wird.

Im einzelnen zeigen sich jedoch recht bemerkenswerte Zusammenhänge. Die schon wiederholt genannten amerikanischen Forscher Lovell, Campell und Boyd haben auf Grund ihrer zahlreichen Versuche die in Abb. 22 wiedergegebene Darstellung veröffentlicht. Sie setzt die Änderung des kritischen (d.h. des höchsten nutzbaren) Verdichtungsverhältnisses in Beziehung zum Verdichtungsverhältnis selbst und zeigt, daß die Bleiempfindlichkeit auch negative Werte annehmen kann. Die miteingezeichnete allgemeine Parabel für  $\Delta \delta_k$  mit dem Exponenten  $k$  wurde von W. Jost [6, S. 557] auf Grund folgender Überlegungen abgeleitet: Die durch den Bleitetraäthylzusatz erreichte Hemmung der Kettenreaktionen wird bei einem bestimmten Kraftstoff durch Steigerung der Verdichtung von dem Werte  $\epsilon_{kr}$  um  $\Delta \epsilon_{kr}$  wieder wettgemacht. Da der Reaktionsablauf in erster Linie von der Temperatur abhängt, eine Temperatursteigerung aber eine um so größere Steigerung der Verdichtung verlangt, je größer diese selbst bereits ist, folgt die in das Bild eingeschriebene Beziehung zumindest innerhalb einer homologen Reihe. Wegen weite-

- 56 -

rer diesbezüglicher Zusammenhänge, über die umfangreiches Versuchsmaterial, besonders von amerikanischer Seite vorliegt, kann auf das Schrifttum verwiesen werden [6, 31].

Die günstigen Erfahrungen, die man mit den sehr wirksamen Gegenklopfmitteln machte, ließen den Gedanken aufkommen, danach zu forschen, ob es nicht auch Stoffe gibt, die sich bei Dieselmotorkraftstoffen in ähnlicher Weise bewähren. Einen Anhaltspunkt für die Richtung, in der die Untersuchungen zu führen waren, gab die Peroxyd-Theorie des Klopfens. Denn da eindeutig erkannt war, daß Peroxyde das Klopfen im Motor fördern, konnte man erwarten, daß sich ihre Anwesenheit bei zündträgen Dieselmotorkraftstoffen in einer Erhöhung der Zündwilligkeit bemerkbar machen wird.

Nach A. R. Ubbelohde [32] sind Peroxyde vom Typus des Wasserstoffperoxyds  $H_2O_2$  und Alkylperoxyde, also Verbindungen mit der Strukturformel  $H - O - O - H$ ,  $R - O - O - H$  oder  $R^{(1)} - O - O - R^{(2)}$  schon in Konzentration von 0,01 % und darunter wirksam, weiterhin Verbindungen wie Alkylnitrite  $R - O - NO$  und Alkylnitrate  $R - O - NO_2$ . Es sind also Stoffe, die durch Trennung der  $O - O$  - oder der  $O - N$  - Bindung leicht zerfallen können. Dagegen sind Äthylenperoxyd mit der Strukturformel



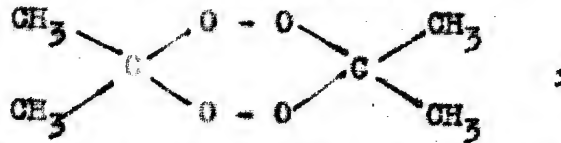
oder höherer Homologe, in denen ein oder mehrere Wasserstoffatome durch aliphatische Radikale ersetzt sind, unwirksam. Offenbar erweist sich die zur  $O - O$  - Bindung parallele  $C - C$  - Bindung bei genügender Kleinheit der Radikale als sehr stabil. Man hat deshalb versucht, Peroxyde der zuerst beschriebenen Art als Zündbeschleuniger zu verwenden. So haben G. D. Boerlage und J. J. Broeze [33] Ergebnisse ihrer Untersuchungen der Wirkung von Tetralinperoxyd veröffentlicht, die wohl eine Steigerung der in Zetanzahlen ausgedrückten Zündwilligkeit erkennen lassen, sich jedoch in keiner Weise mit der Wirkung von Bleitetra-



- 57 -

äthyl oder einem anderen Gegenklopfmittel auf die Klopfestigkeit vergleichen lassen.

In Deutschland wurden Untersuchungen in dieser Richtung insbesondere im Institut für Chemische Technologie der Technischen Hochschule in München durchgeführt 34. Unter den dort untersuchten Peroxyden erwiesen sich als die wirksamsten das Dimethylperoxyd  $\text{CH}_3 - \text{O} - \text{O} - \text{CH}_3$  und das Diäthylperoxyd  $\text{C}_2\text{H}_5 - \text{O} - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_5$ , die zu der schon von Ubbelohde als wirksam erkannten Gruppe gehören. An dritter Stelle steht das Diazeton-Diperoxyd mit der Strukturformel



die zeigt, daß die Moleküle dieser Verbindung offenbar an beiden parallelen  $\text{O} - \text{O} -$  Bindungen leicht in sehr aktive Radikale zerfallen können.

Wenn sich auch diese Stoffe als geeignet erweisen, die Zündung von Dieselmotorkraftstoffen zu verbessern und den Diagrammverlauf günstiger zu gestalten, so haben sie sich bisher in der Praxis nicht durchsetzen können. Einer der Hauptgründe dürfte wohl darin liegen, daß durch oxydationsfördernde Zusätze die Lagerfähigkeit von Kraftstoffen beeinträchtigt wird. Sind es doch gerade die Peroxyde, die für die Harzbildung verantwortlich gemacht werden, so daß der Vorteil der Erhöhung der Zündwilligkeit durch die Gefahr schnellerer Harzbildung erkauft wird. Diese könnte wohl durch Inhibitoren eingedämmt werden, doch scheut die Praxis meist so umständliche Wege. Hierzu kommt, daß, wie im Abschnitt I 3 ausgeführt wurde, der Zündverzug nicht nur von chemischen Eigenschaften abhängig ist, wenn sie auch bei den im Dieselmotor herrschenden Temperaturen eine überragende Rolle spielen. Nur kann durch katalytisch wirkende Zusätze der Ablauf der physikalischen Vorgänge wie Zerstäubung, Verdampfung, Durchmischung usw. in keiner Weise beeinflusst werden. Diese sind aber, wenn auch nicht ausschließlich für den Zündverzug, so doch für den ganzen Ablauf der Verbrennung und



- 58 -

sonit für den Gang des Motors von Bedeutung.

Daraus ergibt sich mit ziemlicher Klarheit, daß trotz gewisser äußerlicher Ähnlichkeiten erhebliche Unterschiede zwischen der Wirkung von Gegenklopfmitteln und Zündbeschleunigern bestehen, Gegensätze, die auf die wiederholt betonten Unterschiede der beiden Motorarten zurückzuführen sind. Man muß sich daher hüten, nur deshalb, weil gewisse Parallelerscheinungen zu erkennen sind, zu erwarten, daß die Entwicklung in vollkommen gleicher Richtung verläuft.

Der einfachste Weg zur Verbesserung zündträger Dieselkraftstoffe ist bis heute das Beimischen der aus der Fischer-Tropsch-Synthese gewonnenen äußerst zündwilligen Kogasine, was im Abschnitt 4 b näher besprochen wurde. Im übrigen bieten sich beim Dieselmotor für den Motorenbauer wesentlich mehr Möglichkeiten, durch Gestaltung und Unterteilung des Verbrennungsraumes die günstigsten Bedingungen für den gewünschten Ablauf der Verbrennung zu schaffen. Dazu wird ihm eine Kenntnis der chemischen Voraussetzung immer nützlich sein.

Auf dem Gebiete der Ottokraftstoffe strebt die Technik heute danach, sowohl die durch das Bleitetraäthyl gebotenen Möglichkeiten zu nutzen als auch durch Anwendung der verschiedenartigsten Verfahren wie Kracken, Polymerisieren, Alkylieren usw. die aus Erdöl, Naturgas und festen Brennstoffen gewonnenen Kraftstoffe besonders klopfest zu machen. Sicherlich nicht unbeeinflusst durch die Entwicklung auf verwandten chemisch-technischen Arbeitsgebieten setzt sich dabei immer mehr das Streben durch, chemisch reine Verbindungen mit hervorragenden Eigenschaften zu erzeugen, wie dies beim Iso-Oktan, Isopentan und einigen anderen nicht namentlich erwähnten Verbindungen bereits der Fall ist. Durch die Bereitstellung großer Mengen solcher Kraftstoffe erwächst auch hier dem Motorenbauer die Aufgabe, den Ottomotor so weiter zu entwickeln, daß die durch die Arbeiten der Kraftstoffchemiker vorbereiteten Fortschritte in großem Umfange nutzbar gemacht werden können.

- 59 -

## II. Beitrag zur Klärung offener Fragen in den letzten Jahren =====

### 1. Die Klopfwert- und Zündwilligkeitsermittlung mit Hilfe von Prüfmotoren

Für praktische Zwecke reichen nach dem heutigen Stand der Forschung die Hilfsmittel der Strukturchemie, der Reaktionskinetik und der Thermodynamik nicht aus, um die Klopfestigkeit oder Zündwilligkeit eines gegebenen Kraftstoffes zu berechnen. Die bis jetzt gewonnenen Erkenntnisse genügen nicht für eine quantitative Auswertung, so aufschlußreich sie auch sind. Es bleibt daher nichts anderes übrig, als die Betriebseigenschaften der Kraftstoffe im Motor selbst zu ermitteln. Seit den von Ricardo unternommenen diesbezüglichen Versuchen wurden verschiedene Bauarten von Prüfmotoren entwickelt, in denen unter mehr oder weniger voneinander abweichenden Bedingungen die Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen bestimmt werden kann. Die wichtigsten, heute verwendeten Motorbauformen sind der sog. CFR-Motor des Cooperative Fuel Research Committee der American Society of Automotive Engineers und der I.G.-Prüfmotor des Technischen Prüfstandes der I.G.-Farbenindustrie AG. Oppau. Beide Motoren sind einander ziemlich ähnlich. Die axiale Verschiebung des Zylinders zur Veränderung des Verdichtungsverhältnisses wird mit Hilfe einer Schnecke und eines Schneckenrades sowie eines auf der Außenseite der Zylinderlaufbuchse sitzenden Gewindes bewerkstelligt; das Gegengewinde befindet sich an der Innenseite des axial festgehaltenen Schneckenrades. Bei dem I.G.-Prüfmotor kann auf einer Trommel gleichzeitig das Verdichtungsverhältnis und die zugehörige Oktanzahl abgelesen werden. Durch Kupplung des Motors mit einer Synchronmaschine wird die Konstanz seiner Drehzahl erreicht.

Beide Prüfmotor-Bauarten sind zur Bestimmung des Klopfens mit dem schon 1922 von Hedgeley entwickelten Springstab (bouncing pin) ausgerüstet. Bei diesem wird die Bewegung einer Membran auf einen Stab übertragen, der durch die im Zylinder auf-

- 60 -

tretende Druckänderung hochgeschleudert wird und zwei elektrische Kontakte schließt, sobald das Klopfen eine bestimmte Stärke erreicht hat. Die Dauer der Berührung der Kontakte wird über eine Elektrolytzelle von einem sehr stark gedämpften elektrodynamischen oder von einem Hitzdrahtinstrument angezeigt. Trotz zahlreicher Versuche, diese Meßeinrichtungen zu verbessern oder durch geeignetere Verfahren zu ersetzen, hat der Springstab als Klopfmesser bis heute seinen Platz behauptet [35]. Er ist verhältnismäßig einfach zu handhaben.

Ein neuer Weg, den Beginn des Klopfens objektiv festzustellen, wurde von der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) eingeschlagen [36]. Schon bei der Beschreibung der Klopfvorgänge wurde auf die Tatsache hingewiesen, daß sich der Beginn des Klopfens durch eine deutliche Erhöhung des auf die Zeit bezogenen Druckanstieges  $dp/dt$  im Zylinder bemerkbar macht. Dieser Wert steigt beim Klopfen auf den vier- bis zehnfachen des Normalwertes an. Noch deutlicher läßt sich der Klopfbeginn erkennen, wenn die zweite Ableitung des Druckes nach der Zeit, nämlich  $d^2p/dt^2$ , also die Änderung des Druckanstieges, gemessen wird, deren Größenordnung bei klopfendem Betrieb ein Hundertfaches des Normalwertes erreichen kann. Trägt man diesen Wert in Abhängigkeit von einer Betriebskenngröße auf, die man bei der Prüfung geändert hat, so macht sich der Klopfbeginn durch einen ausgeprägten Knick im Kurvenverlauf bemerkbar, wie dies Abb. 23 erkennen läßt.

Zur Messung des Klopf ausschlages wird ein Quarzdruckmeßsystem verwendet, dessen Impulse über einen Verstärker auf ein Schreibgerät übertragen werden. Der Druckgeber ist so gedungen ausgeführt, daß er auch unter schwierigen räumlichen Bedingungen an einem Zylinder angebracht werden kann. Damit ist die Möglichkeit gegeben, nicht nur eigens gebaute Prüfmotoren, sondern auch Betriebsmaschinen, selbst solche mit mehreren Zylindern, zu untersuchen; bei diesen stieß eine Klopfmessung bisher auf große Schwierigkeiten.

Wegen näherer Einzelheiten des Gerätes, das auf dem Prüfstand von einem Monteur ohne weiteres bedient werden kann, sei

- 61 -

auf die angeführten Arbeiten verwiesen. Um zu einem Meßergebnis zu kommen, müssen allerdings die ähnlich wie bei Temperaturschreibern aufgenommenen, aus einzelnen Punkten zusammengesetzten Kurven ausgewertet werden.

Die Oktanzahl von Kraftstoffen wird nun in den erwähnten Prüfmotoren nach mehreren voneinander abweichenden Verfahren bestimmt, deren wichtigste Daten in Zahlentafel 4 zusammengestellt sind. Es sind dies:

- a) das alte Research-Verfahren, wie es früher vom Cooperative Fuel Research-Committee angewendet wurde;
- b) das Motor-Verfahren nach den Vorschlägen der American Society for Testing Materials (auch ASTM-Verfahren genannt);
- c) das in Großbritannien eingeführte sog. Flieger-Verfahren des British Air Ministry (auch abgewandeltes Motor-Verfahren genannt);
- d) das von den Laboratorien der Esso-Gesellschaft des Standard-Konzerns vorgeschlagene LT-(Low-Temperature-) Verfahren für Kraftstoffe mit Spaltbenzin- und Benzolzusätzen;
- e) das sog. L 3-Verfahren der Ethyl-Cooperation für gebleibte Kraftstoffe;
- f) das im Jahre 1939 auf Grund der Empfehlungen des Cooperative Fuel Research Committee gegenüber dem ursprünglichen abgeänderte neue Research-Verfahren.

In der letzten Spalte der Zahlentafel 4 sind auch die von US-Army Air Corps vorgeschriebenen Versuchsbedingungen aufgeführt, für die jedoch ein etwa anders gebauter Motor verwendet wird; vor allem wird das Klopfen nicht durch ein Springstabsgerät angezeigt, sondern durch die Temperatur im Verbrennungsraum mit Hilfe eines Thermoelementes gemessen.

Der Grund für die Wahl verschiedener Betriebsbedingungen ist durch das Bestreben zu erklären, sie möglichst den Verhältnissen des praktischen Betriebes im Flugzeug oder im Kraftwagen anzupassen. Dies ist jedoch nur im beschränkten Maße möglich, weil aus der Bestimmung des Klopfwertes noch keine unbedingt



- 62 -

zutreffenden Schlüsse auf das Verhalten eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb gezogen werden können. Über die Notwendigkeit, Kraftstoffe auch im Fahrbetrieb zu erproben, besteht keinerlei Zweifel.

Das Cooperative Fuel Research-Committee hat daher bereits im Jahre 1931 Untersuchungen darüber angestellt, wieweit die Ergebnisse des Research-Verfahrens brauchbare Unterlagen dafür bieten, das Verhalten eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb zu beurteilen. Als Ergebnis der in den Jahren 1932, 1934 und 1937 durchgeführten Fahrversuche wurde dann das unter f) genannte neue Research-Verfahren entwickelt. Trotz der bei diesen Versuchen im einzelnen festgestellten Abweichungen war die Übereinstimmung zwischen Laboratoriumsversuchen und Ergebnissen des praktischen Betriebes besser, als dies bei einigen bis dahin in Deutschland durchgeführten Untersuchungen der Fall war [37]. Der Grund hierfür dürfte wohl darin liegen, daß in den Vereinigten Staaten von Amerika im allgemeinen Kraftstoffe chemisch ähnlicher Beschaffenheit verwendet werden. Handelt es sich doch fast ausschließlich um solche, die aus Erdöl gewonnen sind, wobei die Rohöle keine allzu großen Unterschiede aufweisen. Benzine niedriger Oktanzahlen sind meist straight run-Benzine, solche hoher Oktanzahlen Krackbenzine.

In Deutschland lagen die Verhältnisse in dieser Beziehung viel schwieriger, weil neben den aus Erdöl gewonnenen, teils einheimischen, teils ausländischen Benzinzen mit an sich größeren Unterschieden in der chemischen Struktur der Rohöle auch noch Synthese-Benzine, Hydrier-Benzine und solche mit reichlichem Benzol- oder Alkoholumsatz verwendet wurden. Eine Voraussage über das Verhalten solcher Kraftstoffe im Fahrbetrieb auf Grund der Oktanzahlbestimmung im Prüfmotor ist daher viel schwieriger. Aus einer Mitteilung von W. Witschakowski [38] ist wohl bekannt, daß diesbezügliche Untersuchungen noch in den letzten Jahren von verschiedenen Behörden und anderen Stellen in größerem Maßstab geplant waren, doch liegen Veröffentlichungen hierüber nicht vor.

Zur Erprobung eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb



- 63 -

gehört auch die Klopfmessung an Mehrzylindermaschinen. Sie bietet zusätzliche Schwierigkeiten, weil das Klopfen nicht in allen Zylindern gleichzeitig eintritt und wegen des Betriebsgeräusches an sich schwerer festzustellen ist. Von erheblichem Einfluß ist die Verteilung des Kraftstoff-Luft-Gemisches auf die einzelnen Zylinder, die z.B. wieder durch die Verdampfbarkeit des Kraftstoffes, die Motordrehzahl und die Stellung der Drosselklappe geändert wird [39]. Auf diesem Gebiete können noch umfangreiche Forschungsarbeiten geleistet werden. Doch bleibt dabei offen, ob es möglich ist, durch Einführen von immer neuen Veränderlichen Erkenntnisse zu gewinnen, die verallgemeinerungsfähige Schlüsse auf andere Verhältnisse gestatten.

Bei der Ermittlung des Zündverzuges liegen die Verhältnisse in mancher Hinsicht einfacher. Aus den Ausführungen im Abschnitt I 3 ging bereits hervor, daß der Zündverzug zwar eine Größe ist, die von verschiedenen physikalischen Vorgängen und chemischen Eigenschaften abhängt. Da aber erfahrungsgemäß, wie dort erläutert wurde, die Einflüsse der chemischen Zersetzung des Kraftstoffes im Vordergrund stehen, spielen die Motorbauarten und Betriebsbedingungen keine so große Rolle, wenn es sich darum handelt, Vergleichswerte zu erhalten. Diese Tatsache bleibt bestehen, obwohl die absolute Dauer des Zündverzuges selbstverständlich Änderungen unterliegt, wenn Motorbauart oder Betriebsbedingungen geändert werden. Dadurch erklärt sich die bemerkenswerte Feststellung, daß sehr verschieden arbeitende Verfahren zu einer ungefähr übereinstimmenden Bewertung der Dieselmotorkraftstoffe führen, wobei allerdings nicht verschwiegen werden darf, daß die Streuung innerhalb der Meßwerte größer ist, als bei der schon sehr verfeinerten Oktanzahlbestimmung. Daß die Zündwilligkeit in Zetanzahlen ausgedrückt wird, wobei eine Zetanzahl von 76 gleich ist einem Werte von 100 für die früher gebräuchliche Zetanzahl, wurde bereits erwähnt, desgleichen die praktisch uneingeschränkte Gültigkeit eines additiven Gesetzes bei Mischungen. Einzelheiten über die Meßverfahren folgen im Abschnitt c.

- 64 -

a. Die Gemeinschaftsarbeit an der Klopfwertmessung von Otto-  
kraftstoffen unter Führung des Oppauer Prüfstandes der  
I. G. - Farbenindustrie AG.

Über die Geschichte des Oppauer Prüfstandes und die der dort angewendeten Meßverfahren hat W. Wilke, dessen Initiative auf diesem Gebiete in Deutschland bahnbrechend wirkte, berichtet [40]. Da bereits Mitte der 30er Jahre die Einfuhr amerikanischer CFR-Motoren in das Deutsche Reich auf devisenpolitische Schwierigkeiten stieß, ging man hier dazu über, den bereits erwähnten, von der I.G. entwickelten Prüfmotor in zunehmendem Maße für die Klopfwertbestimmung zu verwenden. Er ist in Abb. 24 in zwei Schnitten wiedergegeben.

Um die an die Klopfwertmessung gestellten Aufgaben nach einheitlichen Richtlinien lösen zu können und die auf verschiedenen Prüfständen gesammelten Erfahrungen auszutauschen, wurden vom technischen Prüfstand der I.G.-Farbenindustrie AG. in Ludwigshafen-Oppau zusammen mit anderen interessierten Stellen Vergleichsversuche angestellt. Die Teilnahme daran war in ständigem Anstieg begriffen. Einen Überblick hierüber und über die dabei erzielten Ergebnisse bezüglich der mittleren Streuung zeigt Zahlentafel 5. Von den aufgezählten Motoren waren zum Schluß etwa zwei Drittel I.G.-Prüfmotoren und ein Drittel CFR-Motoren. Die beiden Abb. 25 a und b zeigen den Zusammenhang zwischen der Zahl der Meßwerte und den Streugrenzen, wie sie sowohl mit dem Research- als auch mit dem Motorverfahren in der letzten der angeführten Versuchsreihen erzielt wurden [41].

Als Ergebnis der früher durchgeführten Arbeiten kann eine bemerkenswerte Steigerung der Meßgenauigkeit bei der Oktanzahlbestimmung festgestellt werden [42]. Dieses Ziel wurde dadurch erreicht, daß zunächst die Einzelheiten der Betriebsbedingungen geklärt wurden, um die Voraussetzungen für vergleichbare Untersuchungen zu schaffen. Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit den Prüfstellen des Zentralbüros (ZB) für Mineralöle die

- 65 -

Mischung der Bezugskraftstoffe IG-Eichbenzin und Eichstoff Z (technisches Iso-Oktan) erprobt, die dann auf der Klopfmestung im Juli 1941 allen Abnahmestellen zur Anwendung empfohlen werden konnten. Zur Bestimmung der Bleiempfindlichkeit wurde vom Oppauer Prüfstand das sog. Oppauer Liniennetz entworfen, das als Ordinate in linearer Teilung die Oktanzahl, als Abszisse eine durch zahlreiche Versuche ermittelte, der logarithmischen ähnliche Teilung für den Zusatz von Bleitetraäthyl in  $\text{cm}^3$  je Liter zeigt. Der Zweck dieses Liniennetzes ist der, die Kurve für die Bleiempfindlichkeit der Kraftstoffe als Gerade erscheinen zu lassen. Wie jedoch von Köhler veröffentlichte Ergebnisse zeigen, trifft dies wohl für viele, nicht aber für alle Kraftstoffe zu [43].

Ein ähnliches Ziel wie mit dem Oppauer Liniennetz sollte auch mit der schon vorher empfohlenen "Ethyl Blending Chart" von Hebl, Rendel und Garton erreicht werden [44]. Diese zeigt auf der Ordinate die Oktanzahlen in etwa quadratischer Teilung und für den Bleitetraäthylzusatz auf der Abszisse eine mit dem Abstand vom Ursprung enger werdende Teilung; die Ordinaten sind aber nicht parallel, vielmehr nimmt ihr Neigungswinkel gegen die Abszisse, von der Nullachse ausgehend, zunächst ab und dann wieder zu. Die in Anmerkung [44] genannten Verfasser hatten in Zusammenhang mit dem Liniennetz der Blending Chart den Begriff der Bleiempfindlichkeit  $S_L$  (lead susceptibility) vorgeschlagen. Diese kann aus der Richtung der in die Blending Chart einzutragenden Geraden für irgend einen Kraftstoff abgelesen werden. Sowohl gegen die Ethyl Blending Chart als auch gegen das Oppauer Liniennetz wendet Th. Hammerich ein, daß ihre Zuverlässigkeit fragwürdig erscheint, weil die Diagrammpunkte rein empirisch ermittelt seien [45]. Hammerich unternimmt es, ein mathematisch einfaches Gesetz für die Wirkung von Bleitetraäthyl aufzustellen, aus dem er den Begriff der sog. mathematischen Bleiempfindlichkeit  $K_m$  von Kraftstoffen entwickelt. Er führt an Hand von sehr vielen Zahlenangaben den Nachweis für die Richtigkeit seines Vorschlags, der sowohl für das Motor- als auch

- 66 -

für das Research-Verfahren anwendbar sei. Ohne damit die Brauchbarkeit dieses Begriffes in Zweifel ziehen zu wollen, kann doch grundsätzlich darauf hingewiesen werden, daß es nicht zulässig erscheint, im Zusammenhang mit der Oktanzahl von einer strengen mathematischen Gültigkeit irgend eines Zusammenhanges zu sprechen, denn die Oktanzahl selbst entbehrt als empirische Größe, die von sehr vielen, rechnerisch kaum zu erfassenden Einflüssen abhängig ist, der Grundlage hierfür. Dies vermerkt auch mit Recht Singer in seiner Stellungnahme. Hammerich geht von der Erfahrung aus, daß die in Prozenten ausgedrückte Erhöhung  $\Delta_{OZ}$  der Grundoktanzahl  $OZ_0$  von Kraftstoffen für gleichen Bleitetraäthylzusatz durch strahlenartig verlaufende Linien dargestellt werden kann; für verschiedene Gruppen von Kraftstoffen schneiden sich diese Linien in einem Punkte. Da sie außerdem bei zunehmendem Bleigehalt in Richtung der Abszissenachse in logarithmisch geteilten Abständen erscheinen, hat Hammerich das in Abb. 26 wiedergegebene Diagramm entworfen. Die beiden darin eingetragenen Randmaßstäbe dienen dazu, um die von ihm definierte und auf dem Diagramm eingetragene mathematische Bleiempfindlichkeit zu ermitteln, indem man die durch den entsprechenden Nullpunkt gehende Parallele bestimmt und den zugehörigen Wert am Rande abliest. Je flacher die Geraden im Diagramm verlaufen, desto größer ist die Bleiempfindlichkeit, d.h. desto geringer ist die für die Erhöhung um eine bestimmte Oktanzahl erforderliche Menge Bleitetraäthyl, oder, was dasselbe ist, desto größer ist die Steigerung des Klopfwertes mit einer bestimmten Menge des Gegenklopfmittels. Wenn man durch ein Diagramm die Abhängigkeit der mathematischen Bleiempfindlichkeit  $E_m$  vom Schwefelgehalt darstellt, so ergibt sich die bemerkenswerte Tatsache, daß die Punkte für gleichartige Kraftstoffe ziemlich gut durch stetige Kurven verbunden werden können, wie Abb. 27 zeigt. Der Schwefelgehalt beeinträchtigt also nicht nur die Klopfestigkeit, sondern auch die Bleiempfindlichkeit, worin sich offenbar seine besondere Aktivität bemerkbar macht. Er wirkt in dieser Hinsicht ähnlich wie der



- 67 -

Sauerstoff der Peroxyde. Es wird sich in der Praxis erweisen müssen, ob das Diagramm von Hammerich oder das Oppauer Liniennetz bevorzugt wird. Beide sind jedenfalls als brauchbare Hilfsmittel für die Vorausbestimmung der Erhöhung der Oktanzahl eines Kraftstoffes bei irgend einem Bleitetraäthyl-Zusatz geeignet, wenn die Wirkung für zwei verschiedene Zusatzmengen bekannt ist.

Als noch ungelöste Aufgabe der vom Oppauer Prüfstand veranstalteten Vergleichsmessungen nannte Wilke bei der 5. Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Klopfmessung - vgl. Anmerkung [53] - insbesondere eine Erklärung für das Klopfverhalten der Synthesebenzine. Diese bereiten wegen der noch nicht erkannten Ursachen für die erhebliche Streuung der Meßwerte einer genauen Klopfwertbestimmung große Schwierigkeiten. Offenbar ist vor allem die Art der Lagerung bei Synthesebenzinen von erheblichem Einfluß, da sie, wie schon ausgeführt wurde, fast rein paraffinischer Natur sind. Nach Abb. 19 bestehen aber im Bereiche niedriger Kohlenstoff-Atomzahlen große Unterschiede selbst bei den Normalparaffinen. Es kann sich also durch Verlust von Butan infolge von Verflüchtigung die Klopfestigkeit merkbar erniedrigen. Weiterhin bedarf noch der Einfluß der in Synthesebenzinen enthaltenen Olefine einer eingehenden Prüfung. Die Olefine sind, wie bereits näher ausgeführt wurde, wesentlich klopfester als die unverzweigten Paraffine. Von Spaltbenzinen her ist jedoch bekannt, daß gerade die Olefine leicht zur Harzbildung neigen, was der Grund für die geringe Lagerfähigkeit solcher Benzine ist. Doch hat man erkannt, daß dies vornehmlich für die Diolefine und solche mit noch größerer Zahl von Doppelbindungen zutrifft. Die in Synthesebenzinen hauptsächlich anzutreffenden Monoolefine sind in dieser Hinsicht harmloser. Schließlich muß noch bei der Untersuchung von Synthesebenzinen die Möglichkeit der Bildung von Peroxyden beachtet werden. Es spielt dabei schon eine Rolle, ob die zu untersuchenden Proben auch nur kurze Zeit dem Tageslicht ausgesetzt waren, selbst in dunklen Flaschen, weil diese die Ultraviolett-



- 68 -

strahlung offenbar nicht genügend absorbieren. Dannefelser stellt daher am Ende seiner Arbeit [53] zu diesem Punkt die beiden noch zu klärenden Fragen:

- a) Besteht eine zahlenmäßige Abhängigkeit der Oktanzahl von der Peroxydzahl, wenigstens jeweils für Synthesebenzine gleicher Oktanzahl und welche?
- b) Bis zu welchem Grad lassen sich gebildete Peroxyde auswaschen und die ursprünglichen Oktanzahlen wieder herstellen?

Als Ergebnis der an Synthesebenzinen bisher durchgeführten Vergleichsversuche ergeben sich nach derselben Quelle folgende Tatsachen:

- a) Die mittlere Streuung bei der Klopfwertmessung von Synthesebenzinen ist mehr als doppelt so groß gegenüber den anderen Versuchskraftstoffen und beträgt  $\pm 1,2$  OZ bei den Versuchen vom April 1942 und  $\pm 1,4$  OZ bei den Versuchen vom Oktober 1942.
- b) Die Größenunterschiede zwischen einzelnen Messungen betragen 7 bis 11 OZ und damit das Zwei- bis Dreifache der sonst üblichen Werte.
- c) Die Streuungen sind auffälligerweise unabhängig von Verdampfungsverlusten und Peroxydbildung und gleich groß bei Prüfung im GFR-Motor und im I.O.-Motor.

Von sonstigen besonderen Arbeiten einiger Prüfstellen, über die auf der 5. (letzten) Klopfmeßtagung berichtet wurde, sei die Bestimmung der Oktanzahlen von Flüssiggasen genannt [46]. Diese Arbeit war dadurch veranlaßt, daß über die Klopfestigkeit von Flüssiggasen und anderen als Kraftstoff in Frage kommenden Gasen im Schrifttum sehr stark voneinander abweichende Angaben zu finden sind. Es sollten deshalb die Versuchsbedingungen genau festgelegt werden, um wiederholbare Werte für die Klopfwertbestimmung zu erhalten, weil diese Kraftstoffe zusätzliche Einrichtungen wie Gasflaschen, Vorwärmer, Regler, Mischgeräte usw. erfordern. Änderungen daran sind nicht ohne Einfluß auf die Oktanzahl. Insbesondere spie-

- 69 -

len der in der Saugleitung herrschende Unterdruck und der Grad der Vorwärmung, die notwendig ist, weil das Gas bei der Entspannung aus der Flasche stark abgekühlt wird, eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Schließlich sei noch eine Arbeit von E. Singer [47] genannt, die über Versuche berichtet, einzelne Betriebsbedingungen des I.G.-Motors zu ändern, die sowohl beim Motorverfahren als auch beim Research-Verfahren gleich sind. Der Zweck der Versuche war festzustellen, wie sich diese Änderungen dann auswirken, wenn Kraftstoffe untersucht werden sollten, die von den üblichen abweichen. Es kommen insbesondere solche mit hohem Paraffingehalt, oder solche, die durch Zumdsehen von Benzol oder Alkohol hergestellt werden, in Frage. Dabei ergeben sich die in Zahlentafel 6 angegebenen Klopffwertänderungen, die erkennen lassen, daß sich die Bewertung insbesondere von bleihaltigen Kraftstoffen bei Änderungen der Betriebsbedingungen viel stärker ändert, als eine unter Normalbedingung gleichwertige Mischung aus n-Heptan und i-Oktan. Ähnlich liegen die Verhältnisse nach der Zahlentafel bei gebleiten Kraftstoffen, die Alkohol enthalten, nur daß bei diesen eine Änderung der Luftüberschuszahl, beim gebleiten Benzolkraftstoff dagegen die Änderung der Drehzahl ohne Einfluß ist.

Abschließend läßt sich sagen, daß die Arbeiten der letzten Jahre auf dem Gebiet der Oktanzahlbestimmung wesentliche Fortschritte gebracht haben, daß aber trotzdem noch eine Anzahl von Fragen offen ist, die eingehender Bearbeitung bedarf. Es ist vor allem nicht zu verkennen, daß die Oktanzahl selbst, wie von berufener Seite immer wieder betont wird, ein zur Zeit zwar unentbehrlicher, nichtsdestoweniger aber unzulänglicher Bewertungsmaßstab ist [6, S. 528; 31, S. 157; 48]. Dabei braucht man nicht so weit zu gehen, wie Scheunemann, der sie sogar als "Irrlicht der Erdölindustrie" bezeichnet [49].

Es darf aber nicht außer Acht gelassen werden, daß durch die Oktanzahlen die Kraftstoffeigenschaften mit Hilfe eines einzigen Wertes gekennzeichnet werden, was bei Kenntnis der

- 70 -

maßgebenden Einflüsse ohne Zweifel als ein kühnes Unterfangen angesehen werden muß. Deshalb verdient der im Nachstehenden zu besprechende Versuch, einen Kraftstoff durch sein Verhalten bei verschiedenen Bedingungen zu kennzeichnen, besondere Beachtung.

b. Das Überlade-Prüfverfahren der ehemaligen Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (Mehrpunktbewertung)

Veranlaßt durch die besonders bei hochwertigen Kraftstoffen offen zu Tage tretenden Unzulänglichkeiten der Oktanzahlbewertung hat es das Institut für Betriebsstoff-Forschung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) unternommen, ein neues Bewertungsverfahren für Ottokraftstoffe auszuarbeiten [50]. Es ist vor allem für sehr klopfeste Benzine gedacht, wie sie im Flugwesen verwendet werden.

Da die Überladung beim Flugmotor eine wichtige Rolle spielt und die Steigerung des Ladedruckes um so weiter getrieben werden kann, je klopfester der verwendete Kraftstoff ist, wurde nicht das Verdichtungsverhältnis, sondern der höchste zulässige Ladedruck als Maßstab für die Bewertung eines Kraftstoffes gewählt; vgl. hierzu auch Abschnitt I 2 d. Bei verschiedenen Luftüberschusszahlen wird nun sowohl der höchst zulässige Ladedruck  $p_{L \max}$  als auch der beim Betrieb an der Klopfgrenze zu erzielende mittlere nutzbare Kolbendruck  $p_{me}$  für verschiedene Ladelufttemperaturen gemessen. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung für einen Flugmotorkraftstoff, der nach dem Motorverfahren die Oktanzahl 97 hat, zeigt Abb. 28. Als Prüfmaschine dient ein luftgekühlter Einzylindermotor Baumuster BMW 132 N. Ursprünglich wurde der Klopfbeginn durch Abhören ermittelt. Nunmehr liegt das in der Einleitung zu Abschnitt B 1 erwähnte Gerät vor, das den Klopfausschlag  $d^2p/dt^2$  mißt.

Bemerkenswert sind die Unterschiede, die sich nach diesem Prüfverfahren für Kraftstoffe verschiedenen chemischen Aufbaues

- 71 -

ergeben. Ein hoher Gehalt an Aromaten hat nämlich zur Folge, daß nicht nur die Minima der dargestellten Kurven höher liegen als bei paraffinischen oder naphthenischen, aus Erdöl gewonnenen Kraftstoffen. Der Anstieg der Kurven im Bereich günstiger Betriebsbedingungen ist noch viel steiler als bei dem in Abb. 23 erwähnten Beispiel, d.h. solche Kraftstoffe sind absolut genommen klopfester, jedoch auch empfindlicher gegen Verschlechterung der Betriebsbedingungen.

Die Bewertung von Kraftstoffen nach dem Überladeverfahren ist, was besonders betont werden soll, unabhängig von der mit einer gewissen Willkür behafteten Kenngröße  $OZ = 100$  und gestattet ohne weiteres die Prüfung von Kraftstoffen mit höherer Klopfestigkeit als Iso-Oktan. Ein Vergleich mit dem Verhalten von reinem Iso-Oktan bereitet keine Verlegenheiten und läßt an Hand der Prüfkurven erkennen, worin die Verbesserung durch Verwendung eines solchen Kraftstoffes liegt.

#### c. Das Zündverzugsverfahren mit verschiedenen Prüfdieselmotoren

Nachdem vom Sonderausschuß zur Normung der motorischen Prüfung von Dieselmotoren beim Verband für die Materialprüfungen der Technik (DVM) auf einer Tagung im April 1942 in Oppau eine Vereinheitlichung des Prüfverfahrens beschlossen wurde, genügt es, die Vorgeschichte nur kurz zu streifen.

Untersuchungen von Dieselmotoren inländischer Herkunft wurden von der I.G.-Farbenindustrie bereits Anfang der 30er Jahre unternommen. Zunächst wurden langsam laufende Einzylindermotoren verwendet, später jedoch eine schnell laufende Bauart gewählt, die nunmehr nach einigen Änderungen und Anpassungen an die Erfordernisse der Zündwertprüfung als sog. I.G.-Prüfmotoren viel zur Zündwertbestimmung verwendet wird. Die Maschine ist in Abb. 29 in zwei senkrechten Schnitten längs und quer zur Welle dargestellt. Sie weist in manchen Punkten Ähnlichkeit mit dem I.G.-Prüfmotor für Ottokraftstoffe auf,



- 72 -

insbesondere was die Verstellung der Zylinderbüchse, des Zylinderkopfes und die Ventilbetätigung durch Kipphebel betrifft. Gemessen wird die Zeit des Zündverzuges, wobei grundsätzlich zwei Möglichkeiten bestehen. Das Verdichtungsverhältnis wird ungeändert gelassen und der mit der Zetanzahl der Kraftstoffe veränderliche Zündverzug in Grad Kurbelwinkel bestimmt. Es bietet jedoch Vorteile, statt dessen das Verdichtungsverhältnis so lange zu ändern, bis der Zündverzug einen festgelegten, für einwandfreien Betrieb als zweckmäßig erkannten Wert erreicht hat. Dies läßt sich an Hand der Abb. 30 a und b erläutern.

Betrachtet man z.B. die Veränderung des Zündverzuges mit der Zetanzahl bei gleichbleibendem Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = 16$ , so sieht man, daß mit dem so eingestellten Motor nur Kraftstoffe geprüft werden können, deren Zetanzahl etwa zwischen 18 und 43 liegt. Denn bei größeren Werten des Zündverzuges ist mit dem eingestellten Verdichtungsverhältnis kein einwandfreier Betrieb mehr möglich; der Kraftstoff zündet nicht mehr regelmäßig. Bei sehr zündwilligen Kraftstoffen werden aber die Unterschiede im Zündverzug bereits so klein, daß wegen des flachen Schnittes der Kurven mit den Ordinaten eine einigermaßen zuverlässige Bestimmung der Zetanzahl nicht mehr möglich ist. Man muß dann das Verdichtungsverhältnis doch ändern, um größere Maßbereiche erfassen zu können. Prüft man aber die Kraftstoffe derart, daß man durch stetiges Verändern des Verdichtungsverhältnisses einen bestimmten Wert des Zündverzuges erreicht, der beim I.G.-Prüfmotor auf  $18^\circ$  Kurbelwinkel festgelegt ist, so sieht man, daß man einen größeren Zetanzahlbereich erfassen kann, vorausgesetzt, daß das Verdichtungsverhältnis zwischen Grenzen geändert werden kann, die weit genug auseinander liegen. Beim I.G.-Prüfdieselmotor betragen sie 1 : 8 und 1 : 25. Durch Extrapolation der in Abb. 30 b wiedergegebenen Kurven ergibt sich, daß damit in einem Zetanzahlbereich zwischen etwa 12 und 55 gemessen werden kann. Ursprünglich wurde beim I.G.-Prüfmotor der Zündverzug mit Hilfe einer



- 73 -

Glimmlampe ermittelt, die beim Einspritzen zum Leuchten und beim Zünden zum Verlöschen gebracht wurde. Sie war am Schwungrad der Maschine befestigt, so daß die Dauer ihres Aufleuchtens, als Kurbelweg gemessen, verhältnismäßig einfach bestimmt werden konnte.

Man wollte nun 1936 so wie für die Prüfung der Ottokraftstoffe auch für die Prüfung von Dieselmotoren Richtlinien festlegen, doch waren die diesbezüglichen Arbeiten noch zu wenig vorgeschritten. Insbesondere waren die Ergebnisse der bis dahin durchgeführten Untersuchungen noch nicht so befriedigend, daß ein bestimmter Motor und ein bestimmtes Verfahren endgültig vorgeschlagen werden konnten. Auch war noch die Frage zu entscheiden, ob der Zündverzögerung gemessen werden soll, wie dies bei dem vorbeschriebenen Prüfmotor der I.G. der Fall war oder ob das im nächsten Abschnitt zu beschreibende, vom Heereswaffenamt in den Vordergrund gestellte Anlaßverfahren geeigneter ist.

Im Laufe der weiteren Entwicklung nach 1936 wurde das Verfahren der I.G. dadurch verbessert, daß nicht nur der Zündverzögerung mit der Glimmlampe, sondern der gesamte Druckverlauf mit Hilfe eines Quarzdruckindikators ermittelt wird. Dieser überträgt seine Meßwerte auf den Leuchtschirm einer Braun'schen Röhre, wodurch man genaueren Aufschluß über den Verbrennungsablauf erhält, als dies bei der Messung des Zündverzögerung mit der Glimmlampe der Fall ist. Außer der I.G. hatte das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart (FKFS) Arbeiten in gleicher Richtung aufgenommen, nur wurde dort der Zündverzögerung bei gleichbleibendem Verdichtungsdruck ermittelt. Als Meßgeräte werden zwei Quarzdruckmesser verwendet, die Einspritzbeginn und Zündung je für sich anzeigen und eine, ähnlich wie bei dem ursprünglichen I.G.-Verfahren auf dem Schwungrad angebrachte Glimmlampe schalten [51]. Neuerdings wird im diesem Institut zum Anzeigen des Zündbeginnes eine Photoselle verwendet. Schließlich seien noch die im Institut für Chemische Technologie der Technischen Hochschule in München, sowie die von der Erprobungsstelle der

- 74 -

Deutschen Luftwaffe unternommenen Versuche erwähnt. Diese verschiedenen Arbeiten haben die Grundlage für die angestrebte Vereinheitlichung des Prüfverfahrens geschaffen. Es wurden deshalb Vergleichsversuche mit 14 Kraftstoffen durchgeführt, deren Ergebnisse in Zahlentafel 7 zusammengestellt sind. Sie standen bei der erwähnten Tagung des Sonderausschusses im April 1942 zur Erörterung [52].

Der bei diesen Versuchen mitverwendete HWA-Motor ist der vom Heereswaffenamt vorzugsweise für sein Anlaßverfahren benutzte Motor der Klöckner-Humboldt-Deutz AG, der mit 960 U/min läuft. Er ist für die Messung des Einspritzbeginns und des durch die Zündung verursachten Druckanstieges mit einem sog. Trägheitsindikator ausgestattet, wie er von H. H. Neumann für die Arbeiten der Rhenania-Ossag entwickelt wurde. Bei ihm wird bei Überschreiten eines durch eine Feder einstellbaren Beschleunigungswertes ein Kontakt geöffnet und damit der Zeitpunkt der Zündung ermittelt. Da durch den auf die Zeit bezogenen Druckanstieg  $d^2p/dt^2$  im Zylinder unmittelbar nach der Zündung eine Beschleunigung der Meßmembrane hervorgerufen wird, die immer ein Vielfaches der größten, durch die Verdichtung erzeugten Beschleunigung beträgt, ist eine Fehlanzeige kaum möglich. Die Beschleunigung der Düsenadel bewegt sich beim Öffnen in ähnlichen Größenordnungen wie die der Membrane bei der Zündung. Der Trägheitsindikator wird deshalb dazu verwendet, sowohl den Einspritzbeginn zu messen, indem er auf die Düsenadel aufgesetzt wird, als auch den Druckanstieg im Zylinder, indem er den Impuls von der Durchbiegungsbeschleunigung einer in die Wand des Verbrennungsraumes eingebauten Membrane erhält. Durch eine geeignete Schaltung wird eine mit der Kurbelwelle umlaufende Neonröhre zum Aufleuchten gebracht, bei der nach Angabe von Neumann die Lage der Kurbelwellenachse mit einer Genauigkeit von einem  $1/10^\circ$  Kurbelwinkel ablesbar sein soll. Bei dem von der Luftwaffe ebenfalls zur Prüfung verwendeten CFR-Motor handelt es sich um den bereits im Abschnitt II 1 erwähnten Motor des Cooperative Fuel Research

- 75 -

Committee, der mit einem für die Untersuchung von Dieselmotoren geeigneten Dieselmotorkopf mit Wirbelkammer ausgestattet ist.

Dem Bericht von O. Kessler kann zusammenfassend folgendes Ergebnis entnommen werden: Wenn man berücksichtigt, daß zwischen den Bauarten der verwendeten Motoren, den Prüfbedingungen und den zur Messung des Zündverzuges verwendeten Geräten beträchtliche Unterschiede bestanden, so kann die Übereinstimmung zwischen den ermittelten Zetanzahlen als recht befriedigend angesehen werden. Allerdings wurden dabei die Ergebnisse der bei der DVL mit einem Motor Bauart Slowak durchgeführten Versuche unberücksichtigt gelassen, weil sie durchwegs aus dem Rahmen der übrigen Ergebnisse herausfielen. Als Ursache für die festgestellten Abweichungen wird der für diese Versuche verwendete Höchstdruckmesser angesehen, mit dem im Gegensatz zu den anderen Prüfstellen nicht der Zündverzug selbst ermittelt wurde. <sup>10)</sup>

Bei einem der geprüften Kraftstoffe streuten die Meßergebnisse am meisten; die größte Abweichung von dem aus den Meßergebnissen aller sieben Prüfmotoren festgestellten Mittelwert beträgt nach oben 4,5 und nach unten 5,0 Zetanzahleinheiten. Hingegen betrug der Mittelwert sämtlicher höchsten Abweichungen bei allen vierzehn Kraftstoffen + 2,4 bzw. - 3,2 Zetanzahl-Einheiten.

Wie aus der Zahlentafel 7 zu ersehen ist, lieferte der FKPS-Motor bei befriedigender Prüfgenaugkeit die mit den Mittelwerten am besten übereinstimmenden Ergebnisse. Da er aber den Zündbeginn mit Hilfe einer Photozelle feststellt, können durch Verschmutzen des erforderlichen Quarzfensters Fehler entstehen. Mit Hilfe des I.G.-Prüfdieselmotors wurden bei guter Prüfgenaugkeit etwas unter den Mittelwerten liegende Zetanzahlen festgestellt. Das Meßgerät mit Braun'scher Röhre

<sup>10)</sup> Im Gegensatz zu diesem Urteil bedeutet das in Abschnitt II 1 beschriebene Gerät der DVL zur Bestimmung des Klopfbeginns durch Ermittlung der zweiten Ableitung der Druckverlaufskurve nach der Zeit einen wesentlichen Fortschritt für die Prüfung von Ottokraftstoffen.

- 76 -

erscheint für eingehende Untersuchungen der Verbrennungsvorgänge sehr geeignet, jedoch nicht für Prüfstellen, an denen mit wenig geschulter Bedienungsmannschaft nur die Zetanzahl ermittelt werden soll. Der HWA-Motor ergab bei ebenfalls guter Prüfgenaugigkeit Werte, die etwas über den festgestellten Mittelwerten lagen. Der bei dieser Maschine ermittelte Trägheitsanzeiger nach Neumann ist verhältnismäßig billig, betriebssicher und leicht zu warten.

Da für die Vergleichsversuche drei CFR-Motoren verwendet wurden, war es möglich, aus den Messungen mit diesen Maschinen Mittelwerte zu bilden. Diese stimmten mit dem Gesamtmittelwert sehr gut überein. Doch ist die Streuung zwischen den einzelnen Meßwerten nicht unbedeutend; die Wiederholbarkeit der Versuche läßt zu wünschen übrig. Bei dem bereits erwähnten Kraftstoff, für den die am meisten voneinander abweichenden Zetanzahlen festgestellt wurden, ergab der eine der CFR-Motoren die genannte große Abweichung von 5,0 Zetanzahleinheiten. Die Streuung beträgt gegenüber dem Mittelwert von 46,7 aus den drei CFR-Messungen beinahe + 10 % und mehr als - 7 %. Auf das zu den Vergleichsversuchen mit herangezogene Anlaßverfahren wird im nächsten Absatz noch eingegangen.

Auf Grund der geschilderten Ergebnisse wurde daher vom "Sonderausschuß zur Normung der motorischen Prüfung von Dieselmotoren" folgendes beschlossen:

1. Genormt wird das Zündverzugsverfahren als Unterlage zur Bestimmung der Zetanzahl.
2. Bei der Prüfung ist der Zündverzug konstant zu halten;
3. hierfür sind der HWA-Motor und der I.G.-Prüfmotor zu verwenden;
4. der Zündverzug ist entweder durch Drosselung oder Verdichtungsänderung konstant zu halten.
5. Als Meßgeräte können verwendet werden: Der Trägheitsgeber nach Neumann (Rhenania-Ossag), der Piezo-Quarzindikator oder der Photozellen-Indikator des Forschungsinstitutes für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmo-



- 77 -

toren, Stuttgart.

6. Für den Zetanzahlbereich von 30 bis 70 kann auch die Aussetzer-Methode im HWA-Motor angewendet werden.

Die in Zetanzahlen ausgedrückte Zündwilligkeit kann das Verhalten eines Kraftstoffes im praktischen Betrieb ebenso wenig ausreichend kennzeichnen wie die durch die Oktanzahl allein ausgedrückte Klopfestigkeit. So wie bei der Bewertung von Ottokraftstoffen hat es auch hier nicht an Versuchen gefehlt, Eigenschaften der Kraftstoffe zu ermitteln, die Rückschlüsse auf das Verhalten im Fahrbetrieb gestatten. Hierzu gehört unter anderem das Startvermögen eines Motors aus dem kalten Zustand, auf das die Zündwilligkeit des verwendeten Kraftstoffes erheblichen Einfluß hat.

#### d. Das Anlaßverfahren des ehemaligen Heereswaffenamtes

Wegen der besonderen Bedeutung, die das Startvermögen für die motorisierten Truppen hat, wurde vom Heereswaffenamt (HWA) der Deutschen Wehrmacht ein Prüfverfahren bevorzugt, bei dem das Anspringen eines Motors festgelegter Bauart untersucht wurde. Selbstverständlich ist es möglich, das auf diese Weise ermittelte Startvermögen eines Kraftstoffes bei gleichbleibenden Versuchsbedingungen in Vergleich zu setzen mit einem aus Zetan und  $\alpha$ -Methyl-Naphthalin hergestellten Kraftstoff, wie dies bei der Zündverzugsmessung üblich ist. Man muß sich aber davor hüten, zu erwarten, daß die auf solche Weise ermittelten "Zetanzahlen" mit den im Zündverzugsverfahren festgestellten durchwegs übereinstimmen. Es trifft dies, wie die im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Vergleichsversuche ergeben haben, nur für Kraftstoffe mit einer Zetanzahl von 35 bis etwa 50 zu. Dies wird deutlich, wenn man die Mittelwerte der beiden Zahlentafeln gegenüberstellt, die O. Kessler [52] veröffentlicht hat. Danach erscheint der Punkt 6 des Beschlusses des Sonderausschusses, wonach das Anlaßverfahren bis zu Zetanzahlen von 70



- 72 -

für anwendbar erklärt wird, nicht ohne weiteres verständlich.

Trotzdem soll die Berechtigung eines solchen Prüfverfahrens nicht verkannt werden. Man muß nur berücksichtigen, daß die Prüfbedingungen vollkommen von denen des Dauerbetriebes abweichen und sich daher Einflüsse geltend machen, die sich bei einem im Beharrungszustand befindlichen Motor nicht auswirken.

Bei dem Prüfverfahren des Heereswaffenamtes, über das P. Weber berichtete [53], wird bei gleichbleibender Betriebstemperatur die Ansaugluft solange gedrosselt, bis ein Zustand erreicht ist, in dem der eingespritzte Kraftstoff beim Anlassen gerade noch zündet. Der im Ansaugrohr eingestellte Unterdruck dient dabei als Maßstab für die Zündwilligkeit, nachdem die Abhängigkeit dieses Wertes von Standardkraftstoffen bekannter Zusammensetzung ermittelt wurde. Auch in den Vereinigten Staaten von Amerika und in Holland war ursprünglich das Anlaßverfahren zur Prüfung von Dieselmotoren gebräuchlich, wurde jedoch offenbar aus den gleichen Gründen, die in Deutschland zu einer Bevorzugung des Zündverzugsverfahrens führten, aufgegeben.

Im Zusammenhang mag hier noch kurz auf Untersuchungen hingewiesen werden, die im Auftrag des Heereswaffenamtes von der Versuchsanstalt für Fahrzeugmotoren und Kraftfahrzeuge an der Technischen Hochschule Berlin durchgeführt wurden [54]. Sie hatten den Zweck festzustellen, welche Beziehungen zwischen der im HWA-Prüfmotor nach dem Anlaßverfahren gemessenen "Zetanzahl" und dem Startvermögen eines Dieselmotors bei tiefen Temperaturen bestehen. Zur Prüfung wurden drei Fahrzeugmotoren herangezogen, die in einer Kältekammer liefen.

In zwei zeitlich auseinander liegenden Versuchsreihen wurden für vierzehn verschiedene Kraftstoffe die in Arbeitspielen ausgedrückten Anlaßzeiten bis zur ersten Zündung bei verschiedenen Temperaturen ermittelt. Die gemessenen Werte wiesen erhebliche Streuungen auf, sowohl innerhalb derselben Versuchsreihe als auch zwischen den bei gleichen Versuchsbedingun-

- 79 -

gen, jedoch in größeren zeitlichen Abständen voneinander gemessenen Werten. Die von Weber veröffentlichten hyperbelähnlichen Kurven, welche den Zusammenhang zwischen den Arbeitspielen bis zur ersten Zündung und der Außentemperatur zeigen sollen, erscheinen bei der großen Streuung nicht frei von einer gewissen Willkür. Der einzige erkennbare Unterschied zwischen den einzelnen Kurven liegt, wie nicht anders zu erwarten, in der Außentemperatur, bei der nach einer gleichen Zahl von Anlaßspielen Zündung eintritt. Der bei allen untersuchten Kraftstoffen beinahe kongruente, asymptotische Verlauf läßt die ebenfalls nicht überraschende Tatsache erkennen, daß mit abnehmender "Zetanzahl" unterhalb einer immer höher liegenden Außentemperatur mit einem Anspringen des Motors nicht gerechnet werden kann. Die aus dem Verlauf der Kurven abgeleiteten Formeln sind wegen der vorerwähnten Willkür bei der Festlegung dieser Kurven von fragwürdigem Wert. Obwohl somit aus diesen Versuchen offenbar keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können, sollten sie nicht unerwähnt bleiben. Denn es ist keineswegs ausgeschlossen, daß sich die Ursachen für die großen Streuungen erkennen und beseitigen lassen. Dann wird auch darauf verzichtet werden können, erst durch Korrekturen, die nicht recht überzeugen, eine einheitliche Grundlage für die Auswertung der Versuchsergebnisse zu schaffen. Jedenfalls werden auch beim Dieselmotor noch umfangreiche Forschungsarbeiten nötig sein, um zu einer Bewertung der Kraftstoffe zu kommen, die praktischen Bedürfnissen weitergehend Rechnung trägt, als dies durch den in Zetanzahlen gemessenen Zündverzug möglich ist.

## 2. Versuche der rechnerischen Ermittlung von Klopffwert und Zündwilligkeit aus chemischen und physikalischen Kenngrößen

Die Meßverfahren zur Ermittlung der Klopfestigkeit und Zündwilligkeit in Prüfmotoren erscheinen im Vergleich zu den für die Ermittlung anderer Kraftstoffeigenschaften angewendeten sehr umständlich; sie erfordern einen gut eingerichteten Prüfstand mit einem nicht unbeträchtlichen Aufwand an Geräten. Daher ist es verständlich, daß verschiedentlich Versuche unternommen wurden, die Verbrennungseigenschaften von Kraftstoffen durch Verfahren zu bestimmen, die den im chemischen Laboratorium üblichen angepaßt sind. Das hat allerdings zur Voraussetzung, daß es möglich ist, die in Kraftstoffen enthaltenen Kohlenwasserstoffe, wenn schon nicht einzeln, so doch wenigstens in Gruppen mit ähnlichen Eigenschaften zu erfassen. Denn wenn man auf Grund des Herkommens und der Verarbeitungsart mit chemisch durchwegs ähnlichen Kraftstoffen rechnen kann, werden sich Berechnungsarten auf Grund chemisch-physikalischer Eigenschaften voraussichtlich eher bewähren, als dann, wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind.

Nun hat sich im Zuge der Besprechung der Einzelheiten des Klopfvorganges, des Verhaltens der chemischen Gruppen der Kohlenwasserstoffe und der motorischen Prüfverfahren gezeigt, daß beim Dieselmotor die Bauart und die Betriebsbedingungen auf das Endergebnis, soweit es nur zu Vergleichen herangezogen wird, wesentlich geringeren Einfluß haben als beim Ottomotor. Die Beschaffenheit des Kraftstoffes kommt also beim Betrieb des Dieselmotors offenbar reiner zur Geltung als bei dem des Ottomotors. Tatsächlich ist es auch zuerst bei Dieselmotorkraftstoffen gelungen, brauchbare Bestimmungsverfahren auf Grund physikalischer Kenngrößen vorzuschlagen, die sich in der Praxis durchgesetzt haben.

Bei dieser Betrachtung darf folgender Unterschied nicht außer Acht gelassen werden. Für den Ottomotor kommen im allgemeinen nur Kraftstoffe mit wesentlich niedrigerem Siedebe-

- 81 -

reich in Frage als für den Dieselmotor. Die Zahl der verschiedenen Kohlenwasserstoffe, die in Ottokraftstoffen vorkommen können, läßt sich daher noch angeben, wenn sie auch sehr beträchtlich ist. Gibt es doch schon, wie aus Abb. 11 zu ersehen ist, bei einer Kohlenstoffatomzahl von 10 - die Siedepunkte liegen dann bei etwa  $100^{\circ}\text{C}$  - 75 mögliche isomere Paraffine (Dekane); diese können in Ottokraftstoffen immerhin noch vorkommen. Die Zahl der in Frage kommenden Olefine beträgt wegen der durch die Zahl und Stellung der Doppelbindungen möglichen Variationen ein Vielfaches. Dazu kommt noch die ebenfalls nicht unbeträchtliche Anzahl von Aromaten und Naphthenen. Bei Dieselmotorkraftstoffen, die im allgemeinen erheblich höhere Molekulargewichte haben, wird aber die Zahl der chemischen Einzelstoffe, die darin enthalten sein können, praktisch unüberschaubar. Man wird demnach bei Dieselmotorkraftstoffen wohl nur dann praktischen Erfolg haben, wenn die an der Bildung von Kraftstoffen beteiligten chemischen Einzelverbindungen mit gleichem oder ähnlichem Verhalten bei der Verbrennung gruppenweise zusammengefaßt werden; oder man versucht, aus möglichst wenigen Werten die Eigenschaften vorauszubestimmen. Dabei bleibt im allgemeinen noch zu klären, welche Mischungsregeln im Falle der gruppenweisen Trennung gelten.

Ob es darüber hinaus einmal gelingen wird, die Eigenschaften von Ottokraftstoffen durch Trennung oder Analyse und anschließende Berechnung aus den Eigenschaften der einzelnen Komponenten zu bestimmen, mag dahingestellt bleiben. Die geringen Abstände zwischen den Siedepunkten der in Frage kommenden einzelnen Verbindungen sind auf alle Fälle als sehr erschwerend für Arbeiten in dieser Richtung anzusehen.

#### a. Verwertung der Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Kenngrößen und der Zündwilligkeit von Dieselmotorkraftstoffen

Einer der ältesten Versuche, die Zündwilligkeit von Dieselm-



Kraftstoffen zu berechnen, geht von dem Verhältnis des Wasserstoffgehaltes zum Kohlenstoff aus. Es ist tatsächlich geeignet, bei Kraftstoffen ähnlicher Herkunft und Verarbeitungsart Anhaltspunkte für die Zündwilligkeit zu geben, weil sie der Reihe nach von den Paraffinen und Olefinen über die Naphthene zu den Aromaten abnimmt. Es gestattet aber keine mit den heutigen Klopfwertbestimmungen vergleichbaren quantitativen Auswertungen. Ähnliches gilt von anderen einzelnen Kenngrößen wie Heizwert, spezifischer Refraktion, Wichte usw.

Heinze und Marder, die eingehende diesbezügliche Untersuchungen angestellt haben [55], schlugen deshalb als geeignetere Kenngröße zunächst den spezifischen Parachor  $P = \frac{\sigma}{d^{1/4}}$  vor, wobei  $\sigma$  die Oberflächenspannung und  $d$  die Wichte bedeuten.<sup>11)</sup> Es hat sich jedoch herausgestellt, daß es mit Rücksicht auf die immerhin vorhandenen Abweichungen von motorisch festgestellten Werten genügt, die Zetanzahl aus der Dichte und einer Siedekennzahl zu errechnen.<sup>12)</sup>

Marder hat einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Dichte und der Zetanzahl, und zwar für das ältere CFR-Verfahren mit Drosselung, für eine Siedekennzahl von 300°C ermittelt;

<sup>11)</sup> Dabei ist zu beachten, daß in der Physik und physikalischen Chemie die Dichte wohl die Dimension  $g/cm^3$  hat; in Übereinstimmung aber mit dem cm-g-s-System ist das Gramm die Masseneinheit und die im technischen Maßsystem übliche Wichte (früher spezifisches Gewicht genannt) ist daher gleich  $\gamma = g \cdot d$  mit  $g$  als Erdbeschleunigung. Der Parachor wurde seinerzeit von B. Sugden: Z. chem. Soc. Bd. 125 (1924) S. 1177, deshalb als physikalische Kenngröße an Stelle der Oberflächenspannung empfohlen, weil er sich gegenüber dieser mit der Temperatur nur wenig ändert, bei nicht assoziierten Flüssigkeiten sogar konstant ist. Er kann bei Berücksichtigung des Bindungsinkrements für einfache Atomverbindungen additiv aus den Atomparachoren errechnet werden.

<sup>12)</sup> Die Siedekennzahl wurde von W. Ostwald: Petroleum, Bd. 22 (1926) S. 678, Bd. 23 (1927) S. 476, vorgeschlagen und wird errechnet, indem man die Siedetemperaturen addiert, bei denen 5; 15; 25; usw., um je 10 steigend, bis 95 Raumprocente übergegangen sind, und die so ermittelte Summe durch 10 dividiert.



- 33 -

die dieser Siedekennzahl entsprechende Zetenzahl kann daher unmittelbar von einer dementsprechend geeichten Aräometerspindel abgelesen werden. Die tatsächlich zu erwartende Zetenzahl wird dann dadurch ermittelt, daß man von dem mit der Spindel gemessenen Wert die mit einem Berichtigungsfaktor multiplizierte Differenz zwischen  $300^{\circ}\text{C}$  und der tatsächlichen Siedekennzahl abzieht. Der Berichtigungsfaktor hat bei der Siedekennzahl  $200^{\circ}\text{C}$  den Wert 0,40 und ändert sich für je 10 Kennzahlen-Einheiten im entgegengesetzten Sinne um 0,01; er hat demnach für eine Siedekennzahl von  $350^{\circ}\text{C}$  den Wert 0,25.

Durch die Berücksichtigung der Siedekennzahl nach den Vorschlägen von Heinze und Harder wird erreicht, daß bei der rechnerischen Ermittlung der Zündwilligkeit die Molekülgröße miterfaßt wird. Sie ist, wie früher dargelegt wurde, von Einfluß auf das Zündverhalten der Kraftstoffe. Die Übereinstimmung der nach diesem Verfahren im Laboratorium vorausbestimmten Zetenzahlen mit den im Prüfzylinder gemessenen ist durchaus befriedigend, zumal, wenn man die Streuung bei der motorischen Prüfung von Dieselmotoren bedenkt. Eine Umrechnung auf die heute übliche Bewertung in Zetanzahlen im Verhältnis 76 : 100 ist ohne weiteres möglich. Außerdem hat Vorberg in einer Arbeit [55] jüngeren Datums die Beziehung zwischen der Dichte bei  $15^{\circ}\text{C}$  und der im I.G.-Prüfdiesel nach dem Zündverzugs-Verfahren ermittelten Zetanzahl neu aufgestellt und als Zahlentafel veröffentlicht. Die Bezugnahme auf eine Siedekennzahl ist beibehalten; die Berichtigungswerte für andere Siedekennzahlen sind ebenfalls in einer Zahlentafel zusammengefaßt. Die Berechnung ist demnach mit dem Aräometer leicht möglich. Sie versagt nur bei Misch-Dieselmotoren und bei solchen, welche Zündbeschleuniger enthalten. Die letzten kommen jedoch, wie in Abschnitt I 5 auseinandergesetzt wurde, praktisch kaum vor. Schließlich sei noch auf eine von R. Tannenberger [56] veröffentlichte Fluchtlinientafel verwiesen, die die Zetenzahl abzulesen gestattet, wenn Dichte und Siedeverhalten gegeben sind.

Gehen Heinze und Harder bei dem vorgeschlagenen Verfahren

- 84 -

von dem Kraftstoff als Ganzen aus, wobei die chemische Konstitution nur mittelbar durch die Dichte eingeführt wird, so ist anderen Verfahren eigentümlich, daß versucht wird, Aufschluß darüber zu erhalten, welche Kohlenwasserstoffgruppen und in welcher Menge sie sich an der Zusammensetzung eines Kraftstoffes beteiligen. Von diesen mehr im Ausland gebräuchlichen Verfahren sei besonders jenes erwähnt, das sich an die bei der Untersuchung von Schmierstoffen gern angewandte Ringanalyse von Waterman anschließt [57]. Bei diesem Verfahren wird versucht, aus der Dichte, der Refraktion [58], dem Anilinpunkt [57, S. 113] und dem mittleren Molekulargewicht das Verhältnis von Aromaten, Naphthenen und Paraffinen zu errechnen, das auch für das Verhalten von Schmierstoffen wichtig ist. Es wird jedoch in Deutschland kaum angewandt.

b. Verwertung der Beziehungen zwischen chemisch-physikalischen Kenngrößen und der Klopffestigkeit von Ottokraftstoffen

Zunächst bieten die gleichen Verfahren, die bei der Berechnung der Zündwilligkeit erwähnt wurden, die Möglichkeit, auch die Klopffestigkeit vorauszubestimmen, denn das gegensätzliche Verhalten der Kraftstoffe in dieser Hinsicht ist ausnahmslos festgestellt. So fand man, daß die Oktanzahl von Destillatbenzinen bei zunehmender Wichte und fallender Siedekennzahl ansteigt. Auch von Parachor, vom Brechungsquotienten, von der Refraktion und ähnlichen Kenngrößen lassen sich Abhängigkeiten der Klopffestigkeit ermitteln, doch sind Berechnungsverfahren, die solche Abhängigkeit ausnutzen, wegen der damit verknüpften Unsicherheiten kaum gebräuchlich. Sie gestatten auch nur eine einigermaßen wahrscheinliche Voraussage, wenn man die Art der Benzine kennt, denn bei Ottokraftstoffen kommen wegen der kleinen Molekülgröße die Feinheiten der Unterschiede im Molekülbau stärker zur Geltung als bei Dieselkraftstoffen.

- 35 -

Dazu kommt, daß die in Oktanzahlen ausgedrückte Klopfestigkeit gegenüber der Zündwilligkeit in noch stärkerem Maße als konventionelle Größe angesehen werden muß; ihr Wert wird von sehr vielen willkürlich festgelegten Kenngrößen des Betriebes der Prüfmotoren beeinflusst. Es ist daher nicht zu erwarten, daß sich die Oktanzahl ohne weiteres aus chemisch-physikalischen Eigenschaften nach einfachen Gesetzen errechnen läßt. Dies zeigt sich z.B. schon daran, daß ein additives Gesetz im allgemeinen nicht gilt. Nichtsdestoweniger wurden von Heinze und Harder [59] Versuche in dieser Richtung unternommen. Sie lehnen sich an ihr bei Dieselmotoren bewährtes Berechnungsverfahren mit Hilfe der Dichte und Siedekennzahl an. In der Praxis hat diese Art der Bestimmung der Klopfestigkeit jedoch nicht den gleichen Anklang gefunden. Inzwischen hat R. B. Cox [60] feststellen können, daß bei der Ermittlung der Klopfestigkeit statt der Siedekennzahl besser der 10 %-Punkt und der 90 %-Punkt der ASTM-Destillation [61] benutzt wird. Cox hat umfangreiche Zahlentafeln mit Faktoren veröffentlicht, die zur Berechnung der Oktanzahl dienen. Auf dieser Grundlage haben Tannenberger und Seifert eine Fluchtlinientafel entworfen, die in der in Ann. [60] erwähnten Arbeit wiedergegeben ist.

Der gleiche Weg, wie er mit Hilfe der Ringanalyse bei Schmier- und Dieselmotoren eingeschlagen werden kann, hat bei Ottomotoren noch zu keinem einigermaßen brauchbaren Ergebnis geführt. Die verschiedenen, von den Chemikern mitunter angewandten gruppenanalytischen Verfahren, um den Gehalt eines Benzins an Olefinen, Saphthenen und Aromaten, den Gehalt an Paraffinen somit als Rest zu bestimmen, sind keineswegs verlässlich und können zu erheblichen Trugschlüssen führen [61].

Ein von den bisher beschriebenen Grundsätzen abweichendes Verfahren, den Gehalt eines Kohlenwasserstoffgemisches an Aromaten zu bestimmen, wurde von J. Josten angegeben [62]. Er benutzt die Tatsache, daß sich ringförmige Kohlenwasserstoffe durch deutlich erkennbaren Einfluß auf die Absorption der ultravioletten Strahlung im Bereich zwischen 2300 und 3500 Å be-

- 86 -

merkbar machen. Es mag dies als einer der vielen Versuche erwähnt werden, die Hilfsmittel der physikalischen Chemie zur Lösung der hier vorliegenden Aufgaben heranzuziehen. Wegen weiterer solcher Möglichkeiten sei auf zwei Arbeiten von A. Dadiou und auf die Monographie von R. Kremann verwiesen [63], in denen diese neuzeitliche Forschungsrichtung allgemein dargestellt ist. Dadiou befaßt sich dabei ausschließlich mit den hier allein in Frage kommenden organischen Verbindungen.

### 3. Von den üblichen Wegen abweichende Forschungsrichtungen

Bei der Vielgestaltigkeit der im Zusammenhang mit der Erforschung der Klopffestigkeit und Zündwilligkeit gestellten Aufgaben ist es nicht verwunderlich, daß von einzelnen Forschern Wege eingeschlagen werden, die von den üblichen abweichen, sofern man unter den letzten die motorischen Prüfverfahren einerseits und die Berechnung aus physikalisch-chemischen Kenngrößen andererseits versteht. Es wären hier zunächst einmal die Untersuchungen in Bomben zu nennen. Eine von diesen Arbeiten, nämlich die von A. Köchlin [7], wurde bereits im Abschnitt I 2 a näher beschrieben, auch wurden dort die Widersprüche, die sich z.T. in Gegensatz zu den Erfahrungen des Motorbetriebes ergaben, erwähnt. Eine wertvolle Unterstützung der diesbezüglichen Forschungsarbeiten ist, soweit es sich um Zündverzugsmessungen handelt, in letzter Zeit in den Arbeiten von K. Stallechner zu sehen, der sich die Aufgabe stellte, die Brauchbarkeit von Photozellen zur Ermittlung des Zündverzuges und zur Untersuchung von Verbrennungsvorgängen zu prüfen [64]. In der gleichen Richtung liegt eine Arbeit von H. Graff [65], der ein ähnliches Verfahren zur Bestimmung des Verlaufes der Gastemperaturen in Ottomotoren verwendet.

Durch Ausnahme von Strahlungsdiagrammen über Verstärker ist es möglich, die Vorgänge bei der Verbrennung vollkommen trägheitslos zu erfassen. Allerdings liegen noch nicht so viele



Versuchsergebnisse vor, daß eine umfassende Verwertung für eine größere Zahl von Kraftstoffen möglich wäre. Gegenüber der beim Prüf-Diesel des Forschungsinstitutes für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren in Stuttgart üblichen Verwendung einer Photozelle zur Anzeige des Zündbeginns - (vgl. Abschnitt II 1 c) - stellen die zuletzt genannten Verfahren einen Fortschritt dar, weil hier nicht nur der Entzündungszeitpunkt, sondern der Verlauf der Strahlung aufgezeichnet und durch Verwendung von Filtern die Intensität in verschiedenen Wellenbereichen bestimmt werden kann. Hieraus können Schlüsse gezogen werden, die an die umfassenden Untersuchungen anschließen, die hauptsächlich an Ottomotoren durchgeführt und in Abschnitt I 2 a und b erwähnt wurden.

Neben den Verbrennungsversuchen in Bomben sind auch alle Arbeiten wichtig, welche die Verbrennung von gas- oder dampfförmigen Kohlenwasserstoffen in strömendem Zustand untersuchen, weil sie geeignet sind, Aufschluß über das verschiedenartige Verhalten dieser Verbindungen zu geben. Die Zahl der diesbezüglichen Arbeiten ist nicht gering. Die dabei zu lösenden Aufgaben sind nicht nur für die Technik des Verbrennungsmotors wichtig, sondern haben allgemeine Bedeutung; ihre Bearbeitung wurde schon in Angriff genommen, als Klopfestigkeit und Zündwilligkeit noch nicht so sehr im Mittelpunkt des Interesses standen wie heute. Eine gute Übersicht über die bis 1939 vorliegenden Ergebnisse ist in dem wiederholt genannten Buch von W. Jost [6] zu finden. Daß die Untersuchung von stetig brennenden Gasflammen für die Erforschung der motorischen Verbrennung nicht ohne Erkenntniswert ist, mag an Hand von Abb. 31 gezeigt werden. Es stellt den Sauerstoffverbrauch je Mol Kohlenwasserstoff abhängig von der Temperatur für die Oxydation isomerer Oktane mit Luft in stöchiometrischer Mischung nach G. Edgar und H. A. Beatty [66] dar. Aus dem Verlauf der Kurven ist das auffällige Verhalten von 2,2,4-Trimethylpentan zu erkennen, so daß die Klopfestigkeit dieses Iso-Oktans als Folge seiner besonderen Verbrennungseigenschaften betrachtet werden



- 38 -

kann. Diese machen sich auch in anderen Erscheinungen bemerkbar, weshalb die Erforschung solcher Zusammenhänge auch für die Motortechnik als Erfolg versprechende Aufgabe anzusehen ist.

Weiterhin sind noch die Versuche zu nennen, welche zwar einen Motor verwenden, ihn jedoch nicht als solchen betreiben, sondern dadurch nur die äußeren Bedingungen für einen möglichst ähnlichen Reaktionsverlauf schaffen wollen. So haben E. Schmidt und H. Mühlner einen flüssigkeitsgekühlten Einliter-Viertaktmotor, der von einer elektrischen Pendelmaschine angetrieben wurde, dazu benutzt, um die Vorreaktionen zu studieren [67]. Sie hielten durch Umwälzung von Äthylenglykol die Temperatur im Zylindermantel auf gleichbleibend  $140^{\circ}\text{C}$ , wärmten das Kraftstoff-Luft-Gemisch auf dieselbe Temperatur vor und bestimmten bei verschiedenen Luftüberschusszahlen den durch die Vorreaktionen verursachten Temperaturanstieg, oder den Unterschied, der sich gegenüber den Verhältnissen ergab, wenn nur reine Luft vom Motor angesaugt, komprimiert und ausgeschoben wurde. Neben der Luftüberschusszahl wurde auch die Drehzahl und das Verdichtungsverhältnis geändert, desgleichen wurde die oben mit  $140^{\circ}\text{C}$  angegebene Temperatur geändert. Die an 13 Kraftstoffen durchgeführten Versuche ergeben einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den festgestellten Temperaturdifferenzen und der Klopfestigkeit. Je geringer diese ist, desto größer sind die Temperaturunterschiede. Bei Alkohol und Benzol konnten in Übereinstimmung mit anderen, bereits erwähnten Versuchen keine Temperaturunterschiede, also keine Vorreaktionen festgestellt werden. Gelegentlich dieser Versuche wurden auch die in der Arbeit [14] genannten chemisch-analytischen Untersuchungen durchgeführt, die jedoch ein abschließendes Urteil noch nicht gestatten.

Von der Erkenntnis ausgehend, daß sich zündträge Kraftstoffe, sofern sie im Ottomotor verwendet werden können, als klopfest erwiesen und bei zündwilligen Kraftstoffen das Gegenteil der Fall ist, haben es einige Forscher unternommen, den Zündverzug von Ottokraftstoffen in Bomben oder ähnlichen Ge-

- 89 -

fassen zu ermitteln. Hierzu gehören die schon Anfang der 20er Jahre durchgeführten Untersuchungen von Tizard und Fye. Diese Forschungsrichtung wurde von Jost und Teichmann [68], in neuerer Zeit von F. A. F. Schmidt sowie von H. Scheuermeyer und H. Steigerwald wieder aufgegriffen [69], wobei das zu untersuchende Kraftstoff-Dampf-Luft-Gemisch durch einen Kolben adiabatisch verdichtet wird.

Die bei diesen Untersuchungen erzielten Ergebnisse haben noch zu keiner einheitlichen Auffassung geführt. Eine Erklärung für die festgestellten Unterschiede kann dadurch gegeben werden, daß bei geringer Verdichtungs geschwindigkeit in den zu solchen Versuchen benützten Apparaturen und bei dem dadurch verursachten hohen Wärmeübergang die scheinbare Aktivierungsenergie wesentlich höher ist, zumindest im Bereiche großer Zündverzögerungen. Es müssen daher offenbar noch die Einzelheiten der Versuchsdurchführung näher festgelegt werden, um zu vergleichbaren Ergebnissen zu kommen.

Zum Schluß soll noch eine Arbeit besprochen werden, in der unter anderem auf Zusammenhänge hingewiesen wird, die bisher nur vereinzelt Beachtung fanden. G. Willfang und E. Willfang [70] weisen darin zunächst darauf hin, daß der Werkstoff, aus dem die Wände des Verbrennungsraumes bestehen, einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß haben kann. Dies ist wohl eine schon seit langem bekannte und im Zusammenhang mit der Erforschung von Verbrennungsvorgängen wiederholt besprochene Erscheinung. Denn an der Wand können die Kettenreaktionen leichter abgebrochen werden. Es trifft aber zu, daß bei der Bestimmung der Klopffestigkeit bisher im allgemeinen auf diesen Umstand noch nicht geachtet wurde. Weiterhin weisen G. und E. Willfang darauf hin, daß gewisse Unstimmigkeiten aufzuklären sind, die zwischen der guten Klopffestigkeit von Olefinen und der Tatsache bestehen, daß diese fast immer von Peroxyden begleitet werden; die Peroxyde werden aber doch ganz besonders für das Klopfen verantwortlich gemacht.

Bei der Kritik der Versuche, Klopffestigkeit und Zündwil-

- 90 -

lichkeit aus physikalisch-chemischen Kenngrößen zu errechnen, zu denen übrigens, soweit sie Paraffinkohlenwasserstoffe betreffen, noch eine in letzter Zeit erschienene Arbeit von A. W. Francis [71] gehört, machen die beiden Forscher darauf aufmerksam, daß bei der Mischung von Benzinen deutlich feststellbare Wärmetönungen zu beobachten sind. Auch deshalb macht also die Berechnung von Oktanzahlen aus laboratoriumsmäßig ermittelten Werten Schwierigkeiten, weil die Entropieänderungen nicht bekannt sind. Dies erklärt zwanglos die erwähnte Feststellung, daß sich das Berechnungsverfahren von Heinze und Marder bei Oktanzahlen nicht durchsetzen konnte; es kommen eben bei den niedrigmolekularen Verbindungen die Besonderheiten der chemischen Struktur stärker zur Geltung. Im übrigen ergibt sich für unverzweigte Paraffine und Olefine der in Abb. 32 dargestellte Verlauf für die Abhängigkeit der nach dem Motor-Verfahren ermittelten Oktanzahl von dem Molvolumen und der Entropie. Auf diesen Zusammenhang haben vor kurzem auch Egloff und Mitarbeiter aufmerksam gemacht [72].

Es zeigt sich, daß die dargestellten Kurven für die Paraffine den stärksten Abfall der Oktanzahl bei jenen Verbindungen aufweisen, welche am leichtesten dazu neigen, Ringe zu bilden. Es wurde in Abschnitt I 4 näher erläutert, daß dabei Ringe mit sechs und allenfalls fünf Kohlenstoffatomen besonders bevorzugt werden. Deshalb sollte das aus der organischen Chemie bekannte, diesbezügliche Reaktionsverhalten im Zusammenhang mit der Klopfestigkeit noch näher untersucht werden. Wegen der weiteren Ausführungen, die sich mit ähnlichen Zusammenhängen bei anderen Hauptgruppen der Kohlenwasserstoffe befassen und die daraus sich ergebenden Forschungsaufgaben unterstreichen, sei auf die angeführte Arbeit selbst verwiesen.

Sehr beachtlich ist jedenfalls die von den beiden Forschern getroffene Feststellung, daß nach allen vorliegenden Untersuchungsergebnissen offenbar eine Klopfestigkeit von 120 Oktanzahl-Einheiten nicht überschritten werden kann, wenn man vereinzelte Angaben, die dem zu widersprechen scheinen, auf

- 91 -

vermutliche Meßfehler zurückführt. Dies würde die am Schluß von Abschnitt I 4 b erwähnte Formel von W. Wilke rechtfertigen, nach der sich dieser Wert für die Klopffestigkeit bei einer Zündwilligkeit von Werte 0 ergibt.

### III. Schluswort

Auf dem Gebiete der Erforschung des meteorischen Verhaltens von Kristallen sind im Verlauf der letzten Jahre durchaus beachtliche Fortschritte erzielt worden. Nichtsdestoweniger sind noch eine große Anzahl von Forschungsaufgaben zu lösen, deren Schwerpunkt sich jetzt, nachdem die Verfahren der meteorischen Prüfung zu einem gewissen Abschluß gelangt sind, mehr der theoretischen Durchdringung verschiebt. Dabei sind die verfügbaren Hilfsmittel der Strukturchemie, Reaktionskinetik und Thermodynamik heranzuziehen.



## IV. Schrifttum

\*\*\*\*\*

zum Bericht Nr. 225, them. Kennziffer I D/2 c

\*\*\*\*\*

**"Klopfestigkeit und Zündwilligkeit (anerkannte Ergebnisse  
und ungelöste Aufgaben der Forschung)"**  
\*\*\*\*\*

Verfasser: Ing. Dr. tech. n. Dr. jur. H. Niediger

- [1] H. K. Kicardo: High-speed Combustion Engines, deutsche Übersetzung: Schnellaufende Verbrennungsmotoren, Berlin 1926, 2. Aufl., 1932, Springer-Verlag.
- [2] C. R. Acad. Sci., Paris 4. 197 (1933) Seite 393; Ann. Off. nat. Comb. liquides Bd. 9 (1934) S. 141 sowie Beitrag in: The Science of Petroleum, herausgegeben von H. Dymsten, A. E. Nash, D. E. Brooks und H. E. Wizard, London (Oxford) - New York-Toronto 1938, 4. H., S. 3054.
- [3] J. Soc. automot. Engr. Bd. 30/31 (1932) S. 283; VDI-Forsch.-Hefte Nr. 366 und 372, VDI-Verlag, Berlin 1934; J. Inst. Petrol. Technol. Bd. 21 (1935), S. 40 sowie Beitrag in: The Science of Petroleum, vgl. Bd. 2, 4. Bd. S. 2894.
- [4] Dieser Vorgang wurde auch zuerst von Bassweiler, Withrow und deren Mitarbeitern mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen bei einer Bildfolge von 5000 je 1/1000 s in Zylinder einer Maschine sichtbar gemacht, in deren Zylinderkopf ein Quarzfenster eingebaut war. Vgl. hierzu C. L. Withrow und Th. A. Boyd: Industr. Engng. Chem. Bd. 23 (1931) S. 538, und C. H. Bassweiler und C. L. Withrow: Industr. Engng. (Chem. Bd. 23 (1931) S. 769, Bd. 24 (1932) S. 528, Autom. Engr. Bd. 24 (1934) S. 281 und 385, J. Soc. autom. Engr. Bd. 31 (1936) S. 297, sowie: The Science of Petroleum, vgl. 2, 4. H., S. 2915.
- [5] H. Nielsen: Der Einfluss der Eigenschwingungen brennender Gas-

gemische auf ihre Verbrennungsgeschwindigkeit, Binn. Techn. Hochsch. Dresden 1933, Forsch. Ing.-Wes. Bd. 4 (1933) S. 300 bzw. Arch. techn. Messen Bd. 3 (Jan. 1936) S. 173; siehe auch A. v. Philinaovich: Z. Elektrochem. Bd. 42 (1936) S. 472.

- [6] L. Jost: Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen, Berlin 1939, Springer-Verlag, S. 503.
- [7] Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 1126.
- [8] Th. A. Boyd: J. Soc. Indust. Engg. Bd. 45 (1935) S. 421.
- [9] Über die ersten diesbezüglichen Arbeiten vgl. J. H. Athrow, H. G. Levell und Th. A. Boyd: Industr. Engng. Chem. Bd. 22 (1930) S. 945, A. Burriel, F. Smith und A. R. Ubbelohde: Phil. Trans. Roy. Soc. London, Bd. 234 (1935) S. 433.
- [10] G. H. Hassweiler und J. H. Athrow: Industri. Chem. Bd. 23 (1931) S. 769, Bd. 24 (1932) S. 528, Bd. 25 (1933) S. 923 und 1939, Bd. 26 (1936) S. 1256, Bd. 27 (1935) S. 872. Bezügl. weiterer Arbeiten in dieser Richtung siehe die zusammenfassende Darstellung in dem Buch von L. Jost 6.
- [11] H. L. Callender: Ingenieur. Bd. 123 (1927) S. 147, 132 und 210; G. Moureaux und Ch. Defraignes: C. R. Acad. Sci., Paris, Bd. 184 (1927) S. 29 und G. Moureaux, Ch. Defraignes und E. Chauré: Ann. Off. nat. Com. Liquides, Bd. 2 (1927) S. 253.
- [12] A. Egerton und A. R. Ubbelohde: Nature London Bd. 133 (1934) S. 179.
- [13] Wegen weiterer Einzelheiten kann besonders auf L. A. Fioletier, B. G. von Neustraten, J. Rittenberg und P. L. Koorssen: Chai. et Ind., Bd. 20 (1939) S. 120, sowie auf eine zusammenfassende Darstellung von L. Fioletier in: The Science of Petroleum, vgl. Ann. 2, 4. Bd., S. 2950 verwiesen werden.

- [14] G. Denckhöfer und F. ...: Z. phys. Chem. (3) Bd. 51 (1942) S. 197; auf die Arbeit von Schmidt und Mühlner wird in Abschnitt II 3 noch eingegangen.
- [15] Vgl. hierzu besonders den Beitrag von G. M. Rosenzeller und C. L. Withrow in: The Science of Petroleum, siehe Ann. 2, 4. Bd., S. 2915.
- [16] G. D. Boerlage und J. ...: Zündung und Verbrennung im Dieselmotor, VDI-Forsch.-Heft Nr. 366, Berlin 1934.
- [17] F. Zinner: Z. VDI Bd. 72 (1931) S. 9, Bd. 83 (1939) S. 141 und 1073. Die beiden zuletzt genannten Arbeiten enthalten ausführliche Schrifttumsverzeichnisse. Vgl. hierzu auch F. A. Schmidt: Theoretische Untersuchungen und Versuche über Zündversag und Klopfvorgang, and H. H. Volfer: Der Zündversag in Dieselmotor, VDI-Forsch. Heft Nr. 362, Berlin 1938, VDI-Verlag.
- [18] Forsch. Ing. Wes. Bd. 9 (1938) S. 1; Z. VDI, Bd. 83 (1939) S. 183.
- [19] Über die neueren, auf elektronentheoretischer Grundlage beruhenden Ansichten, die räumlichen Abstände zwischen den Atomen und die von den Verbindungslinien eingeschlossenen Winkel, siehe G. Wittig: Stereochemie, Akad. Verlagsges., Leipzig 1930; H. Hückel: Theoretische Grundlagen der organischen Chemie, Akad. Verlagsges. Leipzig 1931; H. A. Stuart: Molekülstruktur (Struktur und Eigenschaften der Materie, Bd. 14) Springer-Verlag Berlin 1934, sowie H. Müller: Neuere Anschauungen der organischen Chemie (Organische Chemie in Einzeldarstellungen Bd. 7) Springer-Verlag, Berlin 1940.
- [20] H. Hückel: Z. Elektrochem. 41 (1937) S. 752 und 867; als Sonderabdruck, Grundzüge der Theorie ungesättigter und aromatischer Verbindungen, 2. Aufl., Berlin 1940, Verlag Chemie.



- 94 -

- [21] H. Kölbel: Öl und Kohle, Bd. 14 (1938) S. 1042; Auszug daraus Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 1240.
- [22] W. G. Lovell, J. E. Connell and T. A. Boyd: Industr. Engng. Chem. Bd. 26 (1934) S. 1105.
- [23] Eine zusammenfassende Darstellung hierüber bei W. Harder: Motorkraftstoffe, 1. Bd., Springer-Verlag Berlin 1942, S. 233 bis 362 oder K. L. Rumpf: Öl und Kohle Bd. 38 (1942) S. 2 und 31
- [24] A. W. Francis: Ind. Engng. Chem. Bd. 20 (1928); die von Francis seiner Darstellung zugrunde gelegten Zahlenwerte müssen zum Teil auf Grund neuerer Forschungen berichtigt werden. Eine kritische Zusammenstellung findet sich bei G. S. Parks und H. N. Huffman: Free Energies of some organic Compounds, Chemical Catalogue Comp., New York 1932; siehe auch G. Kglöff: Ind. Engng. Chem. Bd. 29 (1937) S. 1260.
- Hier kommt es nur darauf an, den allgemeinen Verlauf erkennen zu lassen. Dimension und Differenzierung von Abb. 18 sind gegenüber der Wiedergabe bei Harder Motorkraftstoffe 1. Bd. S. 239 ergänzt oder berichtigt. Einige Stichproben der Zahlenwerte an Hand der Angaben in Tafel 3125 von J. d'Ans und H. Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Springer-Verlag, Berlin 1943, S. 710 ff. zeigen nicht unerhebliche Abweichungen. Wegen der Berechnung der freien Bildungsenergie  $\Delta F$  (nach Helmholtz), die identisch ist mit der größten Nutzarbeit einer Reaktion  $N = \Delta F_B - T \cdot \Delta S$ , wobei  $\Delta F_B$  die Bildungsenthalpie in kcal/mol, mol,  $T$  die absolute Temperatur in °K und  $\Delta S$  die Differenz zwischen der Entropie der Verbindungen und der einzelnen Elemente in kcal/mol, Grad bedeuten; siehe die Vorbemerkungen zu der erwähnten Tafel und zu Tafel 3114 des "Taschenbuches" S. 340 f. oder A. Nuckel: Grundriss der physikalischen Chemie, 4. Aufl., Akad. Verlagsges., Leipzig 1934, S. 128 ff., 300 ff.
- [25] G. R. Schultze: Öl und Kohle, Bd. 12 (1938) S. 267 und Bd. 38

(1942) S. 1448; die in der Tafel für die Gleichgewichtskonstante  $K_p$  der ersten Reihe nach der Formel  $\Delta F = - RT \ln K_p$  errechneten Werte decken sich ebenfalls nicht vollständig mit den nach dem "Taschenbuch" [32] bestimmten. Wichtig sind diese Zahlenangaben für die Berechnung von Spaltreaktionen. Sie müssten erforderlichenfalls an Hand der Angaben in Landolt-Börnstein überprüft werden.

[26] Vgl. das Buch von H. Müller [19], S. 114

[27] Einen Überblick über den neuere Stand der Entwicklung auf dem Gebiete der Pyrolyse-, Polymerisations- und Alkylierungsverfahren findet man in dem schon wiederholt genannten Buch von H. Harder 23, S. 362 bis 459.

[28] H. Koch: Brennstoff, 3. Aufl., Bd. 20 (1939) S. 1; Auszug daraus Z. VII Bd. 83 (1939) S. 1143.

[29] Zu diesem Zwecke wurden nach dem Vorschlag der Fa. Schill Rohre verwendet, die von der Mündung senkrecht in die Kammerfüllung eingeführt werden, jedoch vor dem Ausstoßen des fertiggebildeten Kokakuchens entfernt werden müssen. Einen anderen Vorschlag H. Nissenmann ein, der die Destillationsgase durch Öffnungen in den Kammerwänden absaugt und sich dabei die Undurchlässigkeit der über die ganze Kammertiefe reichenden Membran zu Hilfe macht. Vgl. hierzu: H. Nissenmann: Glückauf, Bd. 73 (1937) S. 205; Z. VII Bd. 82 (1938) S. 43.

[30] E. Wilke, Automobiltech. u. d. Bd. 43 (1940) S. 148

[31] H. Harder: Motorkraftstoffe 1. Bd. Springer-Verlag Berlin 1942, S. 499. Die dort zu findenden Bezeichnungen sind teilweise berichtigt oder vereinfacht.

[32] Z. Elektrochem. Bd. 42 (1938) S. 468; siehe auch [12].



- [33] The Science of Petroleum, vgl. Ann. 2, 4. Bd. 1. 2834.
- [34] E. Mohry: Dissertation, techn. Hochsch. München 1936, sowie A. E. Schmidt und E. Mohry: Öl und Kohle, Bd. 36 (1940) S. 122.
- [35] Eine Übersicht über die zahlreichen diesbezüglichen Versuche gibt E. Sinner: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 371/376, der auch über die Bemühungen berichtet, dem Kopf des Springstabgerätes so zu verbessern, daß subjektive Einflüsse bei seiner Einstellung nach Möglichkeit ausgeschaltet werden. Siehe auch E. Mohr: Arch. techn. Wissen, V 8234-7 (1940).
- [36] Vgl. E. Lichtenberger und E. Moser: Autom. techn. Z. Bd. 41, (1938) S. 372; Kraftstoff Bd. 17 (1941) S. 173 und 206; Z VDI Bd. 86 (1942) S. 181.
- [37] Eine gedrängte Übersicht über bei den Fahrversuchen des GPR erhaltenen Ergebnisse findet sich bei E. Kneule: Z. VDI, Bd. 85 (1941) S. 571 mit einer ausführlichen Schriftumsübersicht.
- [38] Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 370.
- [39] E. Kneule: Über diesbezügliche amerikanische Untersuchungen, Z. VDI, Bd. 84 (1940) S. 869.
- [40] Z. VDI Bd. 2 (1938) S. 115.
- [41] Insbesondere E. Sinner: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 359/363, Bd. 39 (1943) S. 887/902; E. Jauchfals: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 363/65, 376/381, Bd. 39 (1943) S. 903/910.
- [42] Näheres findet sich bei E. Köhler: Öl und Kohle Bd. 38 (1942) S. 381, sowie ausnahmsweise bei E. Lindner: Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25, insbesondere Mittel 21 bis 24 S. 32.
- [43] E. Köhler: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 381/383.

- 97 -

- [44] L. E. Nebl, L. E. Röntgen und G. E. Sartorius: Ind. Tagesg., Chem., Analyt. edit. Bd. 25 (1935) S. 187, Bd. 31 (1939) S. 863.
- [45] Th. Hammerich: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 1275 und die Stellungnahme von L. Singer: Öl und Kohle Bd. 39 (1943) S. 424 mit Erwiderung von Th. Hammerich, S. 427.
- [46] F. Rued: Öl und Kohle, Bd. 39 (1943) S. 910.
- [47] Öl und Kohle, Bd. 39 (1943) S. 915.
- [48] F. Spusta: Treibstoffe für Verbrennungsmotoren, Wien 1939, Springer-Verlag, S. 185 ff.
- [49] S. Scheunemann: Fat. Verh. Holz Bd. 19 (1940) S. 112 u. 120.
- [50] F. Moser: Luftf.-Zersch. S. 15 (1939) S. 184 und 311; A. V. Philippovich: Öl und Kohle, Bd. 15 (1939) S. 551; Auszug daraus Z. VDI Bd. 35 (1941) S. 369.
- [51] E. Wilke: Z. DVI Bd. 82 (1938) S. 1135; E. Meyer: Z. VDI Bd. 82 (1938) S. 609 und M. Linder: Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 25.
- [52] G. Kessler: Öl und Kohle, Bd. 33 (1942) S. 1031.
- [53] H. Weber: Öl und Kohle, Bd. 12 (1936) S. 371.
- [54] H. Weber: Öl und Kohle, Bd. 36 (1940) S. 78.
- [55] H. Warden: Öl und Kohle, Bd. 11 (1935) S. 1, 41, 75, 159, 182, 222, 985; H. Helms und H. Warden: Brennst.-Chem. Bd. 16 (1935) S. 286; H. Helms und A. Hoff: Brennst.-Chem. Bd. 17 (1936) S. 441; H. Helms und H. Warden: Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 371; H. Warden und P. Schneider: Automobiltechn. Z. Bd. 39 (1937) S. 195; G. Forbax: Öl und Kohle Bd. 16/35 (1939) S. 497 und Bd. 39 (1943) S. 847 sowie G. Kessler: Öl und Kohle, Bd. 35 (1939) S. 761.

- [56] Kraftstoff, Bd. 17 (1940) S. 218.
- [57] Die diesbenützlichen Vorschläge stammen von J. O. Flinter, H. J. Maternan und A. H. van Kesteren: J. Inst. Petrol. Technol. Bd. 18 (1932) S. 735 und Bd. 21 (1935) S. 664 und 701. Wegen einer kritischen Nachprüfung für Schmieröl-Kohlenwasserstoffe siehe G. K. Schultze und J. C. Nicolay: Öl und Kohle Bd. 37 (1941) S. 617. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich auch bei E. H. Kadner: Schmierstoffe und Maschinenschmierung, Verlag Bornträger, Berlin 1940, S. 117 ff.
- [58] A. Eucken: Grundriss der physikalischen Chemie, 4. Aufl., Akad. Verlagsges. Leipzig 1934, S. 490 ff.
- [59] Angew. Chem. Bd. 48 (1935) S. 335 und 776.
- [60] Refiner natur. Gasol. manufact. Bd. 19 (1940) Nr. 2 und den Bericht über diese Arbeit von R. Tannenbörger und O. Seifert: Öl und Kohle, Bd. 38 (1942) S. 1028.
- [61] Dieses Verfahren ist unter D 285-30T des Berichtes 1932 des Committee D. 2 der American Society for Testing Materials, S. 80 ff. festgelegt.
- [62] Öl und Kohle, Bd. 14 (1938) S. 1021.
- [63] A. Dadiou: Angew. Chem. Bd. 43 (1930) S. 800; Bd. 49 (1936) S. 443; und E. Krenn: Zusammenhänge zwischen physikalischen Eigenschaften und chemischer Konstitution unter Mitarbeit von H. Pastner in: Wissenschaftl. Forsch. Berichte, Naturwissenschaftl. Reihe, Bd. 47, 2. unver. Aufl. Dresden 1943, Verlag Steinkopf.
- [64] H. Stallechner: Zündverzögerung mittels Photozellen in verschiedenen Wellenlängen. Mech.Kraftf.-Forsch. Heft 43, VDI-Verlag, Berlin 1941, S. 31, sowie L. Bisang, 2. VDI Bd. 86

- 99 -

(1942) S. 241. Dort auch Hinweise auf frühere Arbeiten von Bisang und verschiedenen amerikanischen Forschern.

- [65] Luftf.-Forsch. Bd. 18 (1941) S. 8.
- [66] O. Köger u. H. A. Lantay: J. Amer. chem. Soc. Bd. 56 (1934) S. 102, wiedergegeben in dem Buch von F. Jost [6].
- [67] K. Schmidt u. E. Mühling: Forsch. Ing. Wes. Bd. 13 (1942) S. 186; Auszug daraus in Z. VII Bd. 87 (1943) S. 333; E. Mühling: Luftf.-Forsch. Bd. 19 (1942) S. 249.
- [68] F. Jost: Z. Elektrochem. u. Phys. Bd. 47 (1941) S. 262; H. Gleichmann ebenda S. 274.
- [69] F. A. F. Schmidt: Gegenstände: Beeinflussung von Zündschbildung und Zündungsvergange im Verbrennungsmotor. Monr. Dtsch. Akad. Luftf.-Forsch. Heft 2, München 1939, Verlag H. Oldenbourg, sowie Motortechn. Z. Bd. 5 (1943) S. 41; M. Scheuener und H. Steingard: Motortechn. Z. Bd. 5 (1943) S. 229.
- [70] Öl und Kohle Bd. 40 (1941) S. 664.
- [71] Ind. Engng. Chem., Ind. Ed. Bd. 33 (1941) S. 545. Ausführlicher Bericht darüber in: Öl und Kohle Bd. 38 (1942) S. 15.
- [72] O. Kieff und Mitarbeiter: V. Inst. Petrol. Technol. Bd. 27 (1941) S. 121 und 260.



- 100 -

# Verzeichnis der Abbildungen und ihrer Unterschriften

- Abb. 1 Indikatordiagramm (Druckverlauf  $p$  über Kurbelwinkel  $\varphi$ ) und Schwingung  $\alpha$  der Gasmasse bei normaler (a) und bei klopfender (b) Verbrennung in einem Ottomotor.
- Abb. 2 Einfluß der Luftüberschußzahl  $\lambda$  bei der Verbrennung eines Pentan-Luft-Gemisches. Anfangsdruck  $p_a = 2,5$  ata; Anfangstemperatur  $t_a = 30^\circ$ .  
 $k_{max}$  = größter Klopfschwingsausschlag  
 $v$  = mittlere Brenngeschwindigkeit  
 $\pi$  = größtes Drucksteigerungsverhältnis
- Abb. 3 Größte Klopfschwingsausschläge  $k_{max}$  für ein Pentan-Luft-Gemisch (a) und ein Benzol-Luft-Gemisch (b) abhängig von der Luftüberschußzahl  $\lambda$ . Anfangsdruck 2,5 ata; Anfangstemp.  $t_a = 30^\circ$ .
- Abb. 4 Größte Klopfschwingsausschläge  $k_{max}$  bei der Verbrennung eines Pentan-Luft-Gemisches in Abhängigkeit von Anfangsdruck  $p_a$  in der Bombe bei einer Anfangstemperatur  $t_a = 30^\circ$  für verschiedene Luftüberschußzahlen  $\lambda$ .
- Abb. 5 Verlauf der Klopfschwingsausschläge  $k_{max}$  bei der Verbrennung eines Benzol-Luft-Gemisches abhängig von der Luftüberschußzahl  $\lambda$  bei zwei verschiedenen Anfangstemperaturen  $t_a$ ; Anfangsdruck  $p_a = 2,5$  ata.
- Abb. 6 Klopfgrenze bei Änderung der Temperatur  $t_1$  und des Druckes  $p_1$  der Induktluft für zwei Luftüberschußzahlen  $\lambda$ .  $n = 2000$  1/min;  $\epsilon = 1 : 7$ ; Kraftstoff: Benzin; Motor: Wasserpumpe.
- Abb. 7 Mittlerer Induktionsdruck  $p_e$  und bezogener Kraftstoffver-



- 101 -

breuch  $b_0$  in Abhängigkeit von der Luftüberschneßzahl bei verschiedenen Ottomotoren. Die Werte für  $p_0$  und  $b_0$  sind des besseren Vergleichs wegen so umgerechnet, daß sich bei  $\lambda = 1,0$  für beide Werte 100 % ergeben.

	Hubraum $V_h$	$n$	
Kurve a: wassergekühlt	4 l	1770 U/min	1 : 5,5
" b: luftgekühlt	3 l	-	-
" c: wassergekühlt	-	-	-
" d:	2 l	2600 U/min	1 : 8
" e: luftgekühlt	1 l	3500 "	1 : 6,8

**Abb. 8** Idealer (a) und tatsächlicher (b) Druckverlauf  $p$  über dem Kurbelwinkel  $\varphi$  bei der Verbrennung im Dieselmotor. 1 Zündverzögerung; 2 Durchzünden; 3 gesteuerte Verbrennung (bis Einspritzende); 4 Nachbrennen.

**Abb. 9** Zündverzögerung  $t_z$  in  $^\circ$  K- $^\circ$  (Gradkurbelwinkel), Drucksteigerungsgeschwindigkeit  $dp/dt$  und Höchstdruck  $p_{max}$  für verschiedene Kraftstoffe abhängig von der je Zylinder zugeführten Wärmemenge  $Q$  in einem Dieselmotor.

a Gasöl;	d Steinkohlenteeröl
b Braunkohlenteeröl	e chemisch behandeltes Steinkohlenteeröl
c Steinkohlenschwefel	

**Abb. 10** Druckverlauf  $p$  beim Dieselmotor abhängig von Kurbelwinkel und vom Kolbenweg  $V_k$ .

a ohne Einspritzung	c Einspritzbeginn bei einer um
b Einspritzbeginn $10^\circ$ vor	50 % höheren Drehzahl soweit
oberen Totpunkt bei normaler Drehzahl	ververlegt, daß Zündung wie bei b eintritt
d wie c, aber Verbrennungsende wie bei b	

Bedeutung von 1 bis 4 wie in Abb. 8;  $V_k$  Kompressionsraum.

**Abb. 11** Siedepunkt  $t_s$  von Normal- und Isoparaffinen mit fünf bis zehn Kohlenstoffatomen. Die eingetragenen Siedepunkte der verzweigten Kohlenwasserstoffe sind Mittelwerte. Die

- 102 -

sind für Heptan und Oktan wegen der verhältnismäßig geringen Zahl bekannter Isomeren noch unsicher.

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| a Normalparaffine             | $Z_0$ = Kohlenstoffatomzahl                          |
| b Isomere mit 1 Verzweigung   | $M_0$ = Molekulargewicht                             |
| c Isomere mit 2 Verzweigungen | $Z_1 \max$ = Zahl der möglichen Isomeren             |
| d Isomere mit 3 Verzweigungen | $Z_1$ = Zahl der bekannten und untersuchten Isomeren |
| e Isomere mit 4 Verzweigungen | $\triangle$ = unberücksichtigte anormale Werte.      |

**Abb. 12** Atomgitter der beiden Kohlenstoff-Modifikationen Graphit und Diamant.

**Abb. 13** Anordnung, Abstände und Winkel der Kohlenstoffatome in der oberen Misch-Lock-Kette des n-Heptans. Die Wasserstoffatome stehen derart in Raume, daß die Kohlenstoffatome in Mittelpunkt von Tetraedern erscheinen.

**Abb. 14** Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit einem Misch-Diesel-Kraftstoff (ausgezogene Linien) und einem handelsüblichen Gasöl (gestrichelte Linien) in einem 30/35 PS Vierzylindermotor bei 1450 U/min in Abhängigkeit von der Leistung N.

- a Spezifischer Kraftstoff-Verbrauch  $b_0$
- b Auspufftemperatur  $t_a$
- c Kohlenmonoxidgehalt der Auspuffgase  $x_{CO}$

**Abb. 15** Höchstes mögliche Verdichtungsverhältnis  $\epsilon_{\max}$  abhängig vom Molekulargewicht n der klopfesteren Komponente einiger Kraftstoffgemische, nach dem alten Research-Verfahren (vgl. Abschnitt II 1) ermittelt.

- a i-Oktan in n-Heptan
- b Benzol in n-Heptan

- 103 -

- c Zyklohexan in n-Heptan
- d Benzol in 1-Öktan
- e Bicyklopentadien in 1-Öktan
- f ungefähres Gebiet der Handelsbenzine aus Erdöl.

**Abb. 16** Schematische Darstellung der Änderung der Klopfintensität von Kraftstoffen bei Mischung.

**Abb. 17** Die Veränderung des kritischen Verdichtungsverhältnisses  $\epsilon_{kr}$  ungesättigter Kohlenwasserstoffe gegenüber den gesättigten gleicher Kohlenstoffatomzahl.  
a Äthan; b Propan; c Pentan; d Hexan; e Heptan; f Öktan.

**Abb. 18** Freie Bildungsenergie  $\Delta F$  bezogen auf ein Kohlenstoffatom der Verbindung für einige Paraffine, Olefine, Aromaten sowie für Äthylen abhängig von der Temperatur  $t$ .  
a Methan; b Äthan; c n-Hexan; d n-Öktan; e Äthylen; f n-Heptan; g Zyklohexan; h Benzol; i Toluol; k Naphthalin; l Acetylen.

**Abb. 19** Das kritische Verdichtungsverhältnis  $\epsilon_{kr}$  beim Betrieb im Ottomotor für einige Normal- und Isoparaffine niedriger Kohlenstoffatomzahl  $L_c$  in Abhängigkeit von dieser.  
a Äthan; b Propan; c Pentan; d Hexan; e Heptan; f Öktan.

**Abb. 20** Einfluß verschiedener Zusätze Z auf die nach dem CFR-Motor-Verfahren gemessene Oktanzahl  $R_{OZ}$  eines Destillatbenzins von der Siedekohlentzahl 70.  
a Diisopropyläther; b Isoöktan; c Isopentan; d Benzol.

**Abb. 21** Die relative Gegenklopfwirkung  $K_g$  von 1 Gramm atom Stickstoff verschiedener Anilinderivate, ausgedrückt in Anilinäquivalenten in Abhängigkeit von der Kohlenstoffatomzahl  $L_c$ , je Molekül und der Struktur.

**Abb. 22** Kritisches Verdichtungsverhältnis  $\varepsilon_{kr}$  verschiedener  $\Delta \varepsilon$  Kohlenwasserstoffgruppen und seine Änderung (bei Zusatz von 1 cm<sup>3</sup> Methyläthyl je Gallone (3,79 l)).

Paraffine und Naphthene;  $\Delta$  Aromaten (gesätt. Seitenketten);  $\alpha$  - Olefine, Diolefine, Acetylene;

andere Olefine;  $\alpha$  ungesättigte Ringverbindungen.

a Benzolbereich  $\alpha$  ungesätt. Kettenkohlenwasserstoffe

b Paraffine und  $\alpha$  ungesätt. Ringverbindungen.  
Naphthene

**Abb. 23** Klopfanschlag  $a^2 p/dt^2$  abhängig vom Ladedruck  $P_L$  & Klopfbeginn.

Die für zwei Versuchsreihen eingetragenen Punkte lassen die Wiederholbarkeit gut erkennen.

**Abb. 24** I.G.-Prüfmotor für Ottokraftstoffe.

Bohrung 65 mm

Hub 100 mm

Hubraum 132 cm<sup>3</sup>

Leistung rd. 1 kw

Drehzahl 1600 U/min.

a Springstadienindikator

b Schnecke mit Schneckenrad zum Verändern des Verdichtungsverhältnisses

c Scala für Verdichtungsverhältnis

d Scala für Drehzahl

e Vergaser

f Unterbrecher.

**Abb. 25** Verteilung der Messgrenzen bei den im Motor 1942 durchgeführten Vergleichsmessungen.

**a u. b**

a nach dem Research-Verfahren

b nach dem Motor-Verfahren



- 105 -

Ordinate  $y$  = Zahl der Lebewerte in  $\pm$  innerhalb der  
Stützgrenzen  $x$

Abszisse  $x$  = Stützgrenze in  $\pm$  ROK bzw.  $\pm$  ROK

ROK = Research-Oktanzahl

ROK = Motor-Oktanzahl.

**Abb. 26** Diagramm zur Bestimmung der mathematischen Klempfindlichkeit ( $R_m$ ) von Ottokraftstoffen.

$x_1$  = Abszisse Motor-Methode;

$x_2$  = Abszisse Research-Methode;

$a$  = OFR-Motor-Methode;

$b$  = OFR-Research-Methode.

$$\text{Motor-Methode } R_m = \frac{\Delta \text{OK}}{50 \log 100 c + 15}$$

$$\text{Research-Methode } R_m = \frac{\Delta \text{OK}}{50 \log 100 c + 2}$$

$c$ Vol. %	$50 \log 100 c$	$c$ Vol. %	$50 \log 100 c$	$cm^3$ in U.S. Gallons	$c$ Vol. %	$50 \log 100 c$
0,02	15,05	0,07	44,25	0,05	0,0132	6,0
0,03	23,85	0,08	45,15	1,—	0,0294	20,1
0,04	30,10	0,09	47,40	2,—	0,0539	36,2
0,05	34,85	0,10	50,00	3,—	0,0793	45,6
0,06	38,90	0,11	52,10	4,—	0,1057	51,2

**Abb. 27** Einfluß des Schwereigenschaftes  $a$  auf die Klempfindlichkeit  $R_m$  von Benzin mit einer Grund-Oktanzahl OK<sub>0</sub> von 65 bis 68 für das OFR-Moterverfahren.

$a$  Straight-run-Benzine;  $b$  Spaltbenzine.

**Abb. 28** Mittlerer nutzbarer Kollendruck  $p_{ne}$  und höchster

**zulässiger Ladedruck  $p_L$  max** an der Klopfgrenze für einen Kraftstoff mit einer nach dem Moterverfahren gemessenen Oktanzahl (ROK) von 87 in Abhängigkeit von der Luft-Überschußzahl  $\lambda$ , in einem luftgekühlten Zylinder-motor ermittelt.



- 116 -

**Abb. 29** I.G.-Prüfmotor für Dieselmotorkraftstoffe in Zreus- und Aufsicht.

Bohrung 95 mm  
 Hub 150 mm  
 Hubraum 1065 cm<sup>3</sup>  
 Leistung rd. 3 kW  
 Drehzahl 1000 U/min

(veränderlich zwischen 500 und 2000 U/min)

- a Düsenhalter und Einspritzkontakt
- b Nockenrad zum Verändern des Verdichtungsverhältnisses
- c Nockenrad zum Festklappen des Zylinderkopfes
- d Kraftstoffpumpe
- e Seitenablenkgerät für den Indikator

**Abb. 30** Zetanzahl  $Z_n$  abhängig vom Verdichtungsverhältnis und Zündverzögerung  $t_v$  in °K.-s.**Abb. 31** Sauerstoffverbrauch in Mol je Mol Kohlenwasserstoff, abhängig von der Temperatur  $t$  für die Oxidation isomerer Oktane mit Luft in stöchiometrischem Verhältnis.

- a n-Oktan
- b 3-Methylheptan
- c 3-Methylhexan
- d 2,5-Dimethylhexan
- e 2-Methyl-3-Methylpentan
- f 2,2,4-Trimethylpentan

**Abb. 32** In Oktanzahlen ausgedrückte, nach dem Motorverfahren ermittelte Klopfestigkeit (KOE) unverzweigter Paraffine und Olefine, abhängig vom Molvolumen  $V_M$  und der molaren Entropie  $S_M$  für die Gasphasen bei 298°K berechnet.

• Paraffine

• Olefine

- - - - -

## **Verszeichnis der Zahlentafeln**

- Zahlentafel 1** Vergleich der Kennwerte eines Steinkohlenteeröl-Mischdieselmotorkraftstoffes mit denen eines ausländischen Motorkraftstoffes.
- Zahlentafel 2** Gegenklopfwirkung einiger Aminverbindungen, ausgedrückt in Anilinäquivalenten bezogen auf Grammatome Stickstoff (vgl. Bild 21).
- Zahlentafel 3** Gegenklopfwirkung einiger metallorganischer Verbindungen, ausgedrückt in Anilinäquivalenten.
- Zahlentafel 4** Die Betriebsbedingungen der verschiedenen Prüfverfahren zur Bestimmung der Oktanzahl im CFR- oder I.C.-Motor.
- Zahlentafel 5** Ergebnis der bis Oktober 1942 von der Arbeitsgemeinschaft (Arge) für Klopfmessung durchgeführten Vergleichsversuche (VV) zur Ermittlung der Klopfestigkeit von Ottokraftstoffen.
- Zahlentafel 6** Änderung der in Oktanzahlen ausgedrückten Klopfestigkeit von Benzol- und Ethanolgemisch gegenüber einem Standardgemisch aus n-Heptan und i-Oktan bei Einhaltung der aufgezählten Werte der Betriebsbedingungen.
- Zahlentafel 7** Die bei den Vergleichsversuchen des "Sonderausschusses zur Normung der motorischen Prüfung von Dieselmotorkraftstoffen" erhaltenen Ergebnisse der Zetanzahlbestimmung nach dem Zündverzugsverfahren.

— — — — —

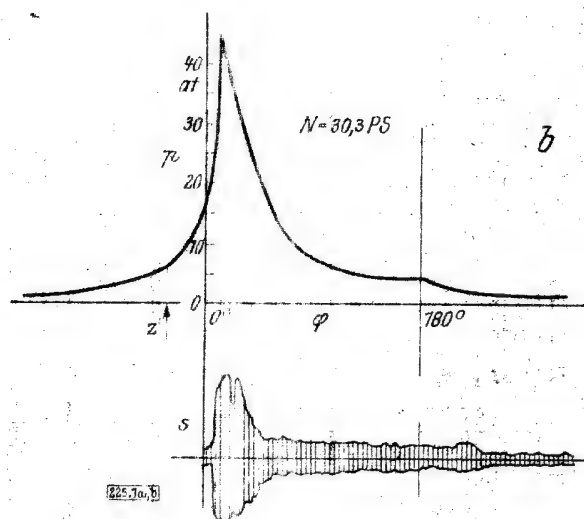
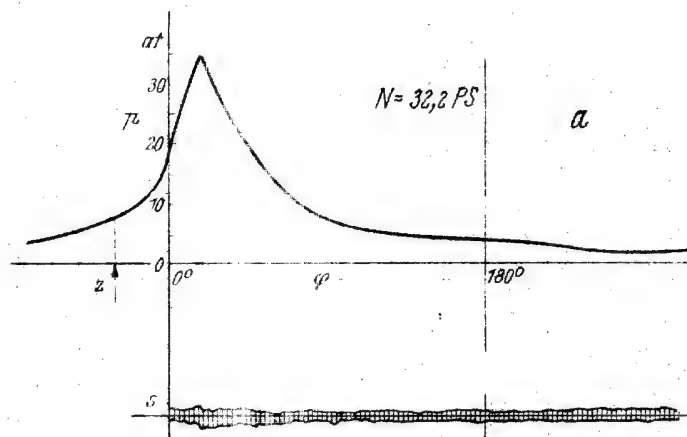


Abb. 1a, b  
Pnc. 1a, b

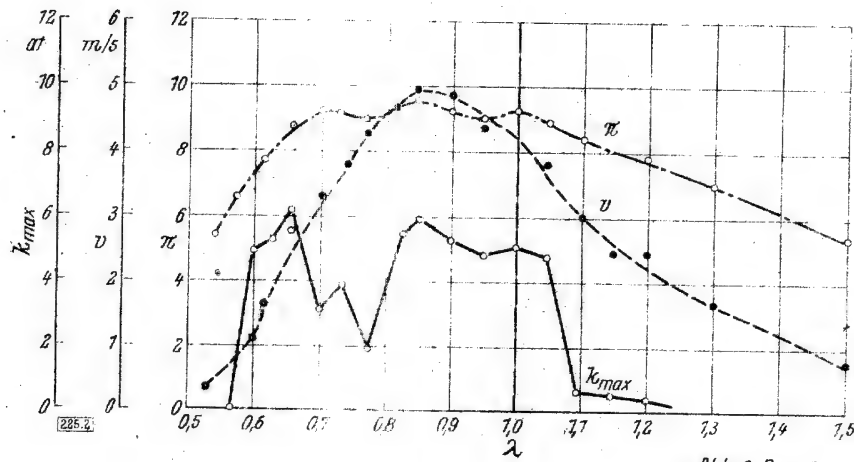


Abb. 2 Pnc. 2

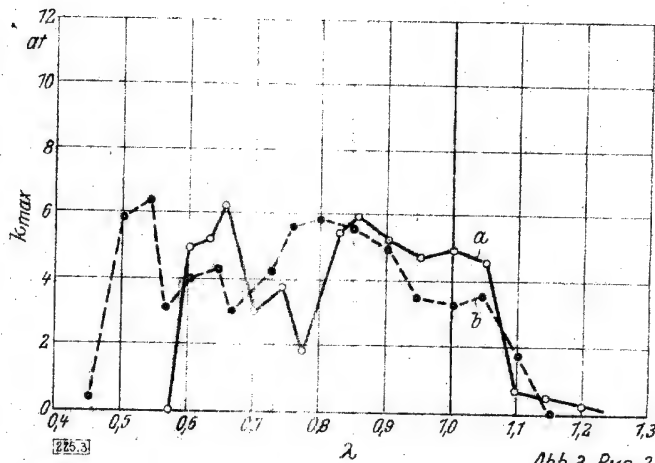


Abb. 3 Pnc. 3

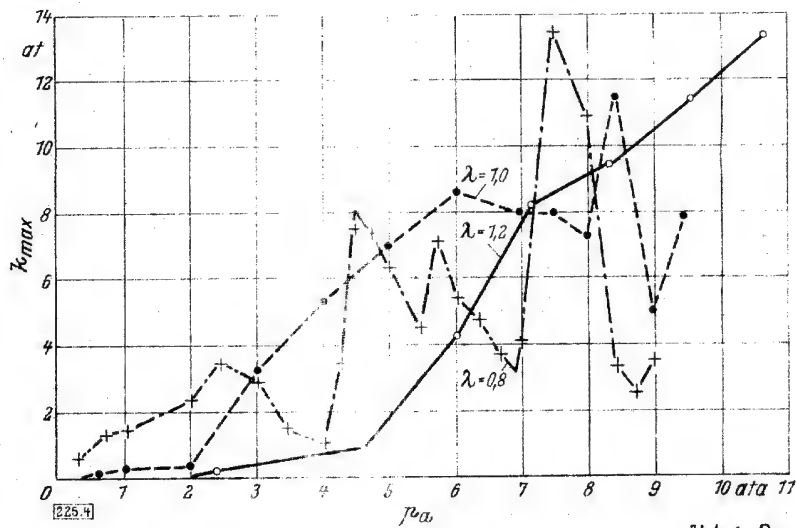


Abb. 4 Рис. 4

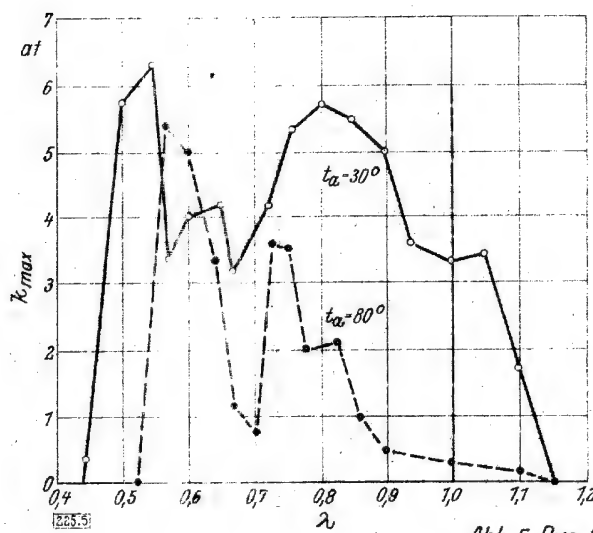


Abb. 5 Рис. 5



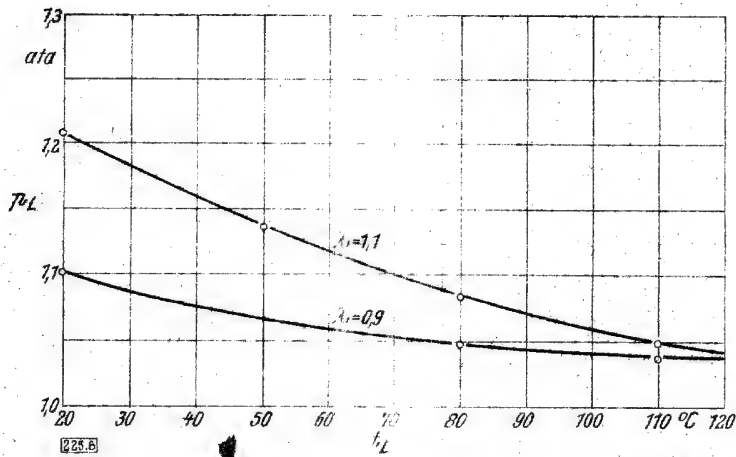


Abb. 6 Рис. 6

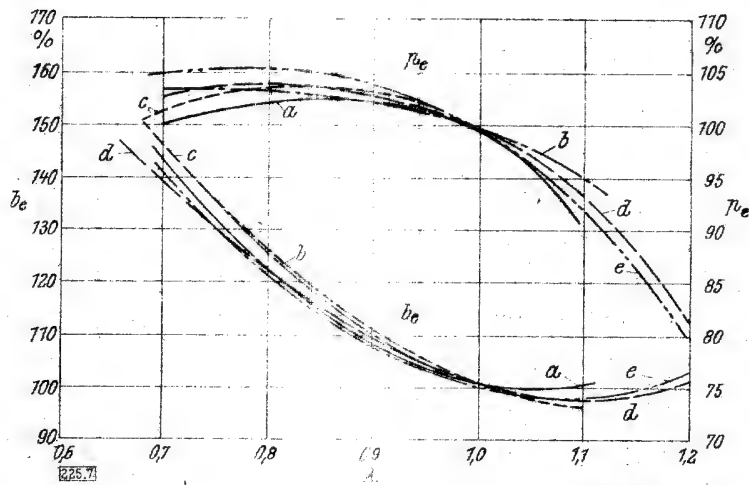


Abb. 7 Рис. 7

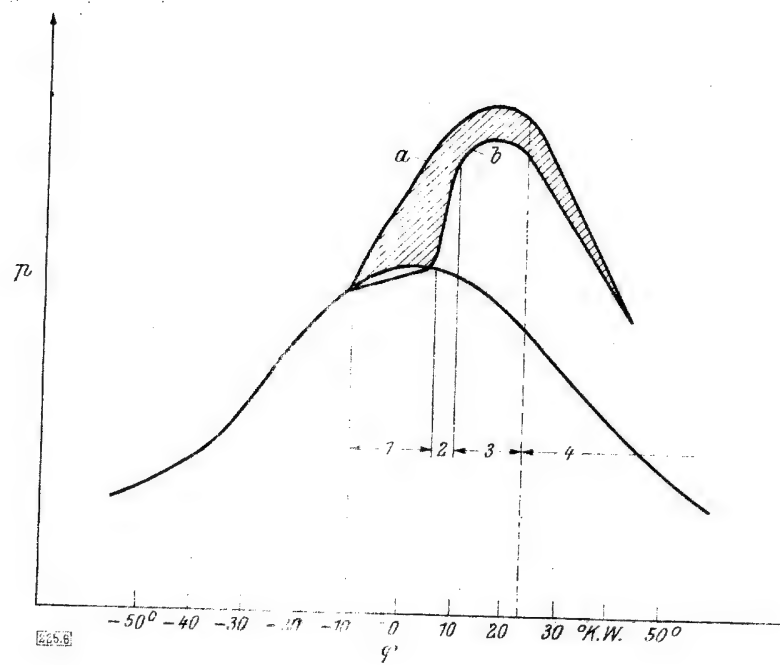


Abb. 8  
Рис. 8

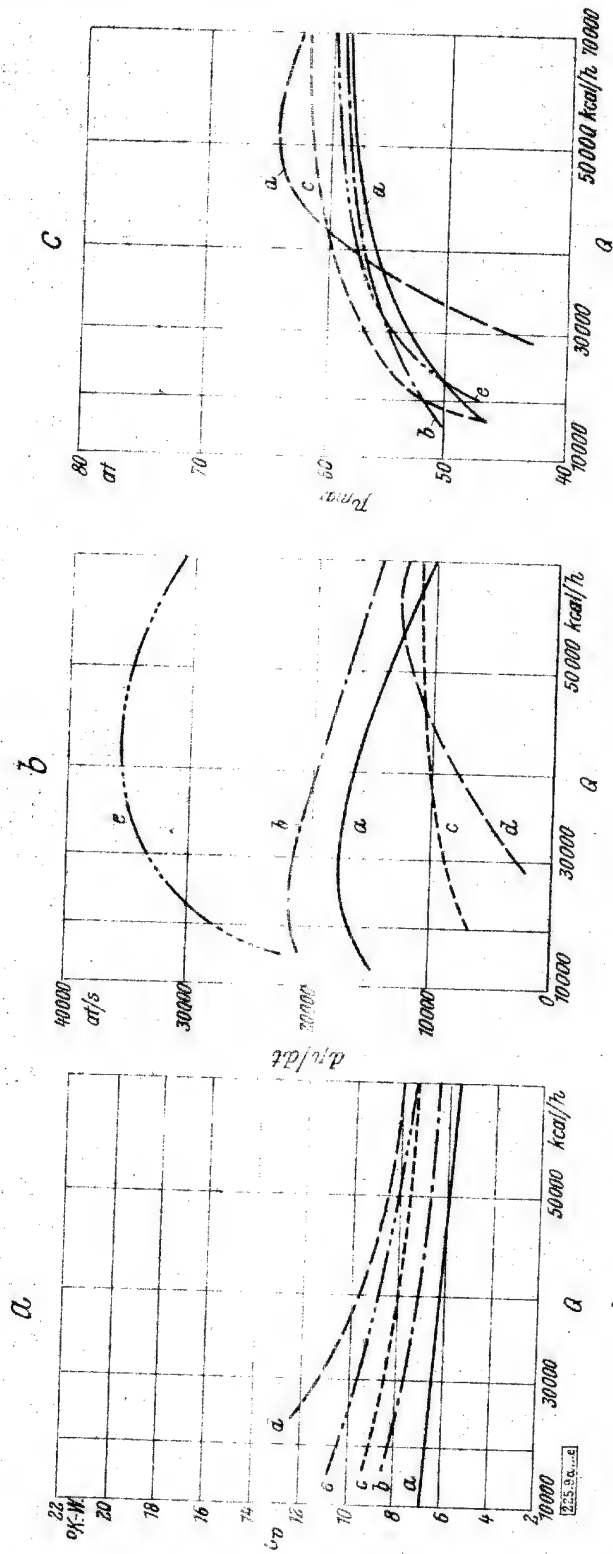


Abb. 9a...c  
Рис. 9a...B

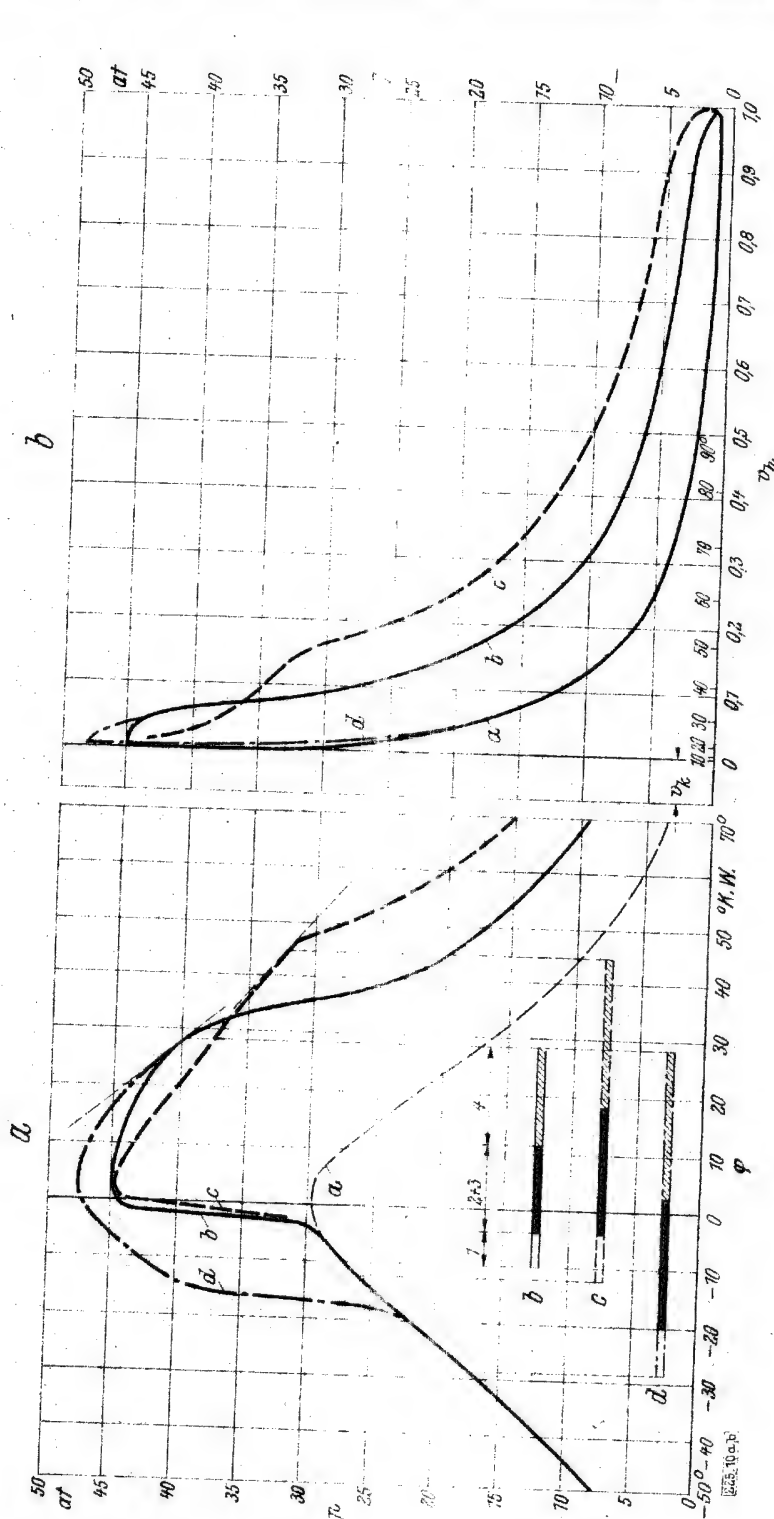


Abb. 10a, b  
Рис. 10a, б

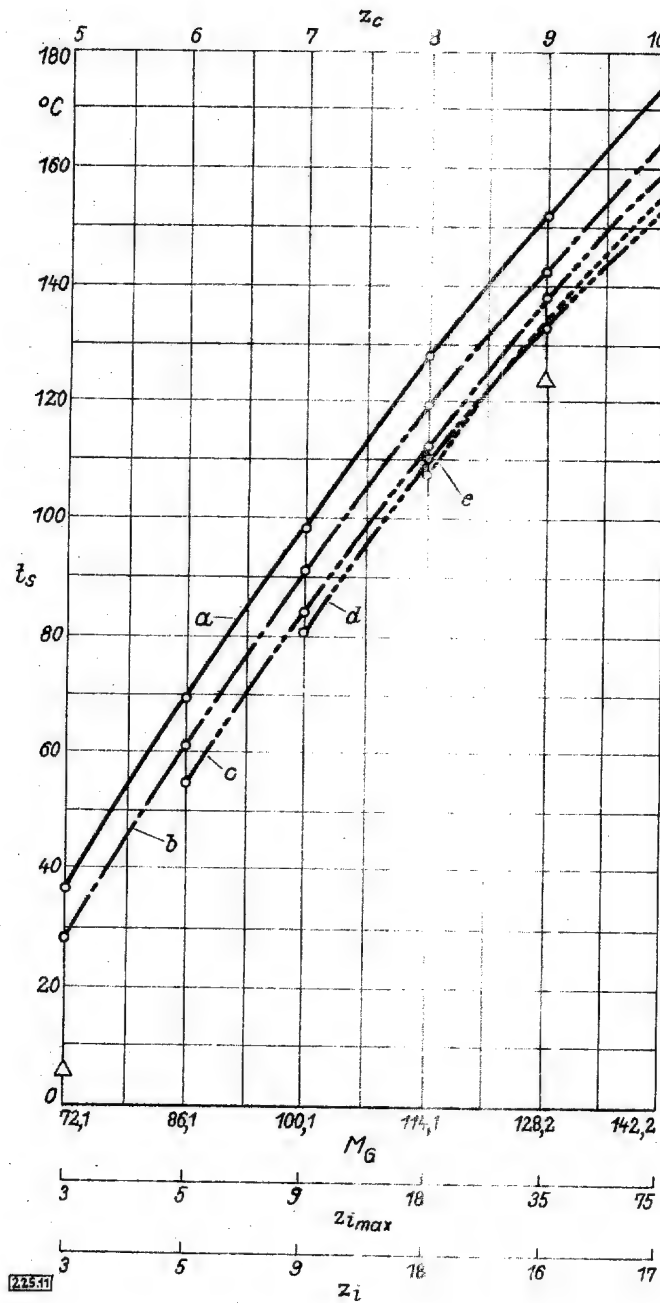


Abb. 11  
Рис. 11



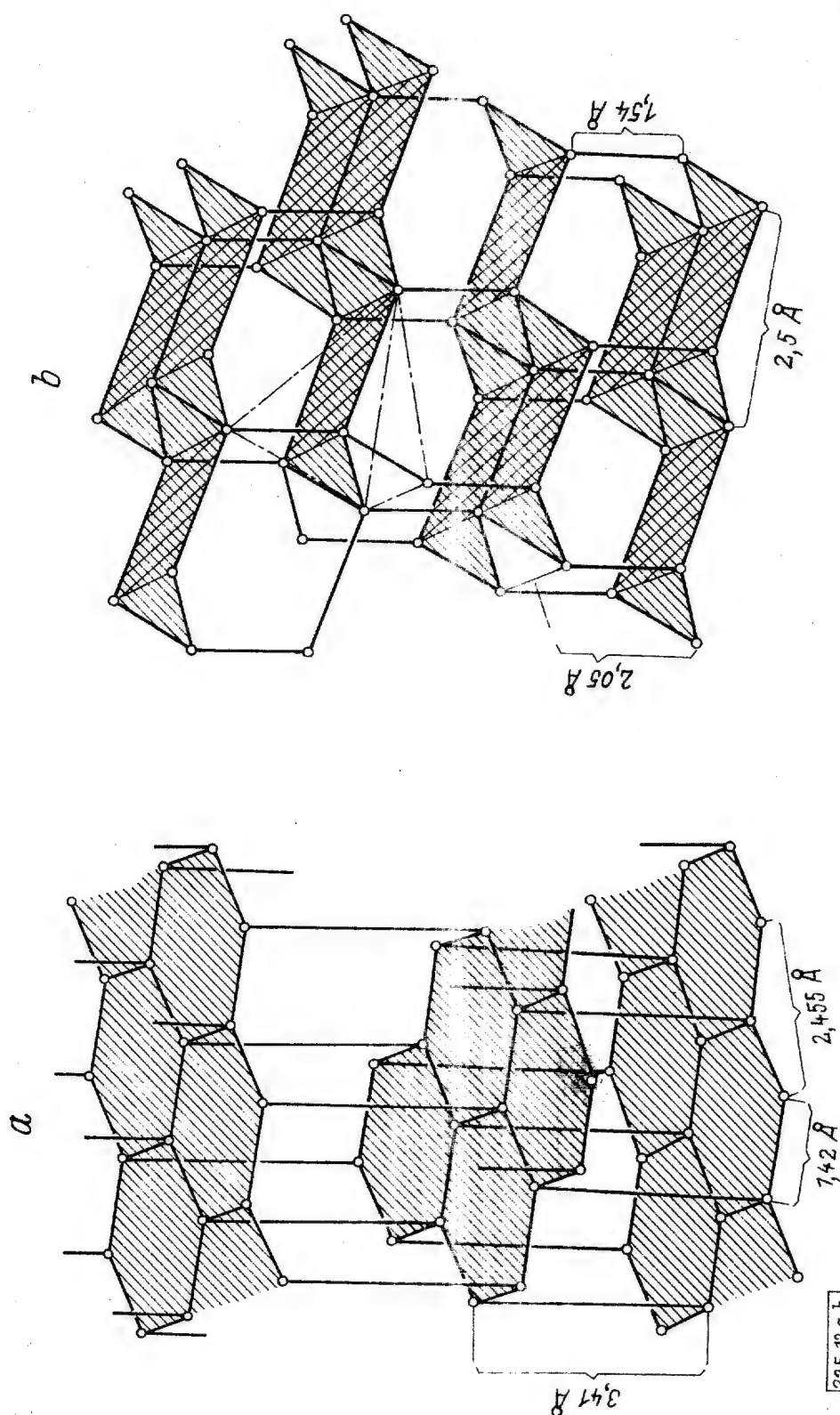


Abb. 12a, b Рис. 12a, б

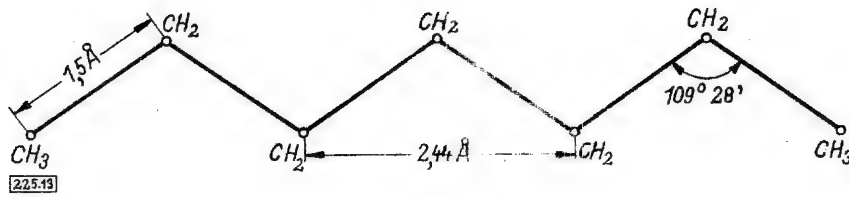


Abb. 13  
Рис. 13

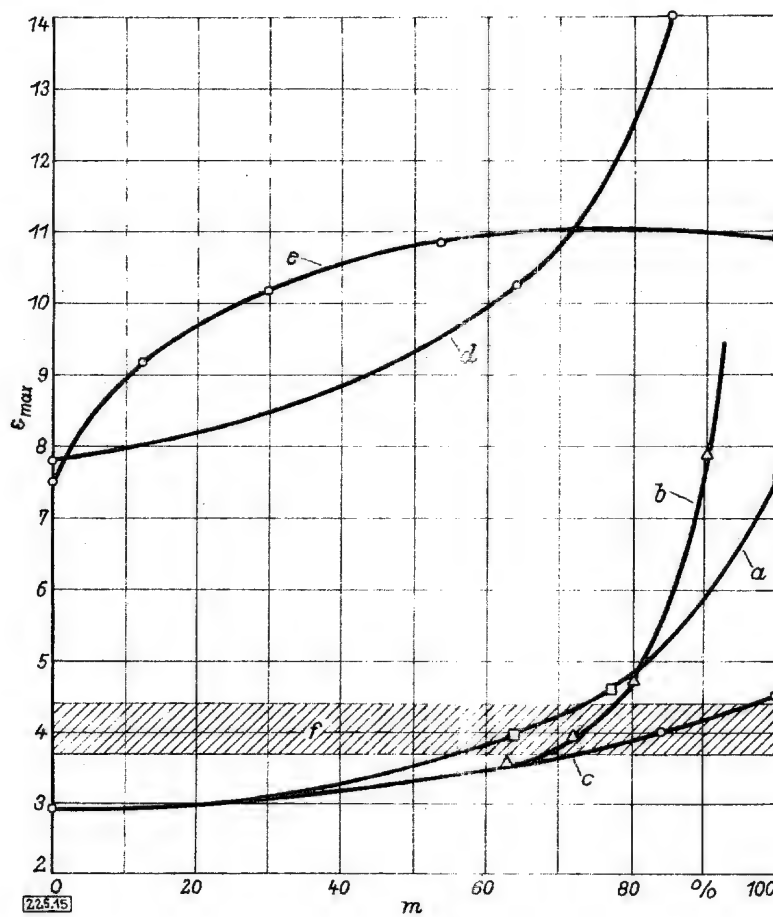


Abb. 15  
Рис. 15

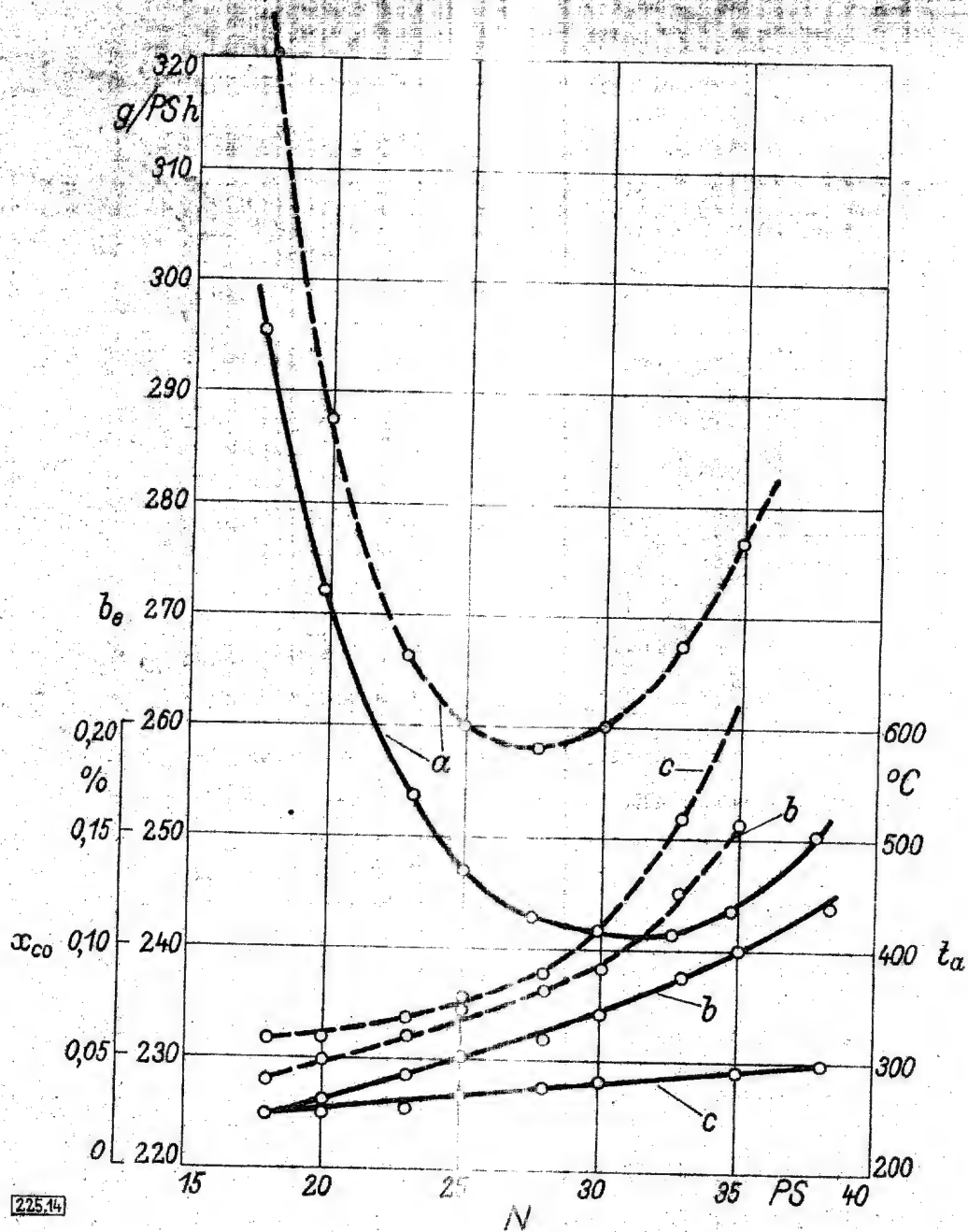


Abb. 14  
Рис. 14

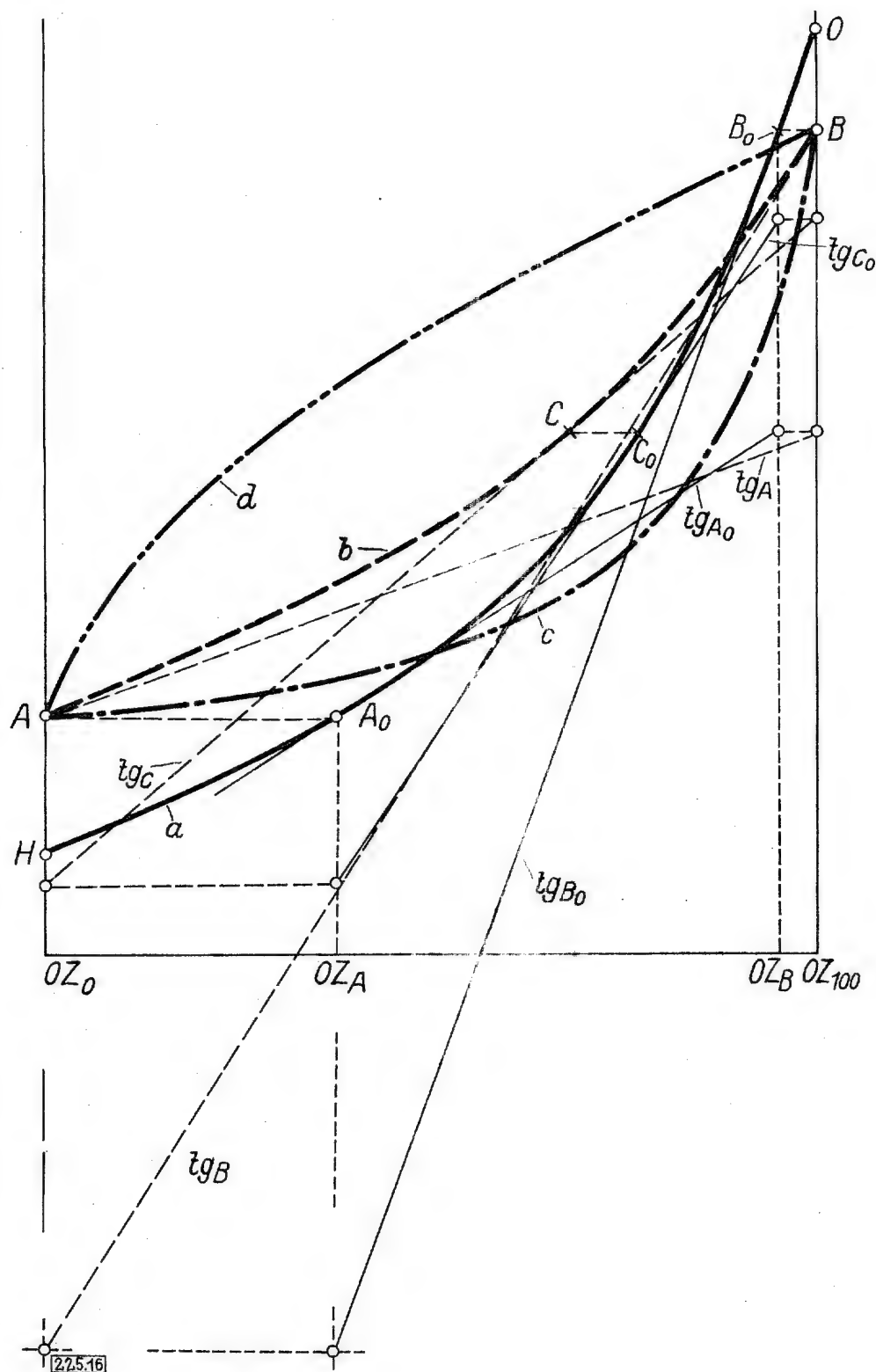


Abb. 16  
Рис. 16

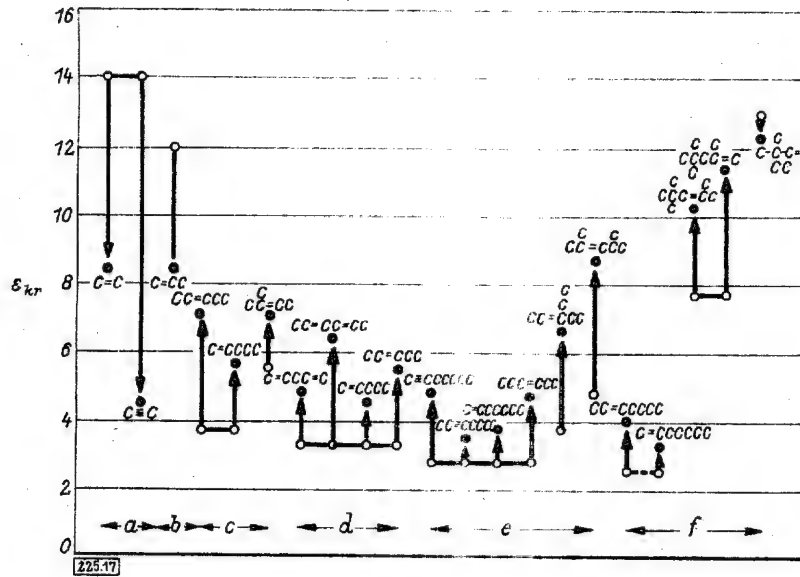


Abb. 17  
Рис. 17

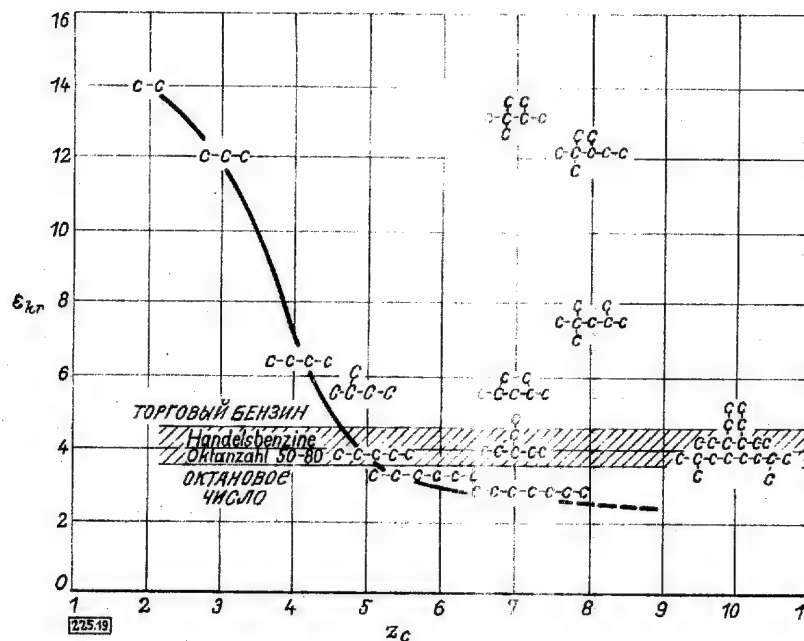
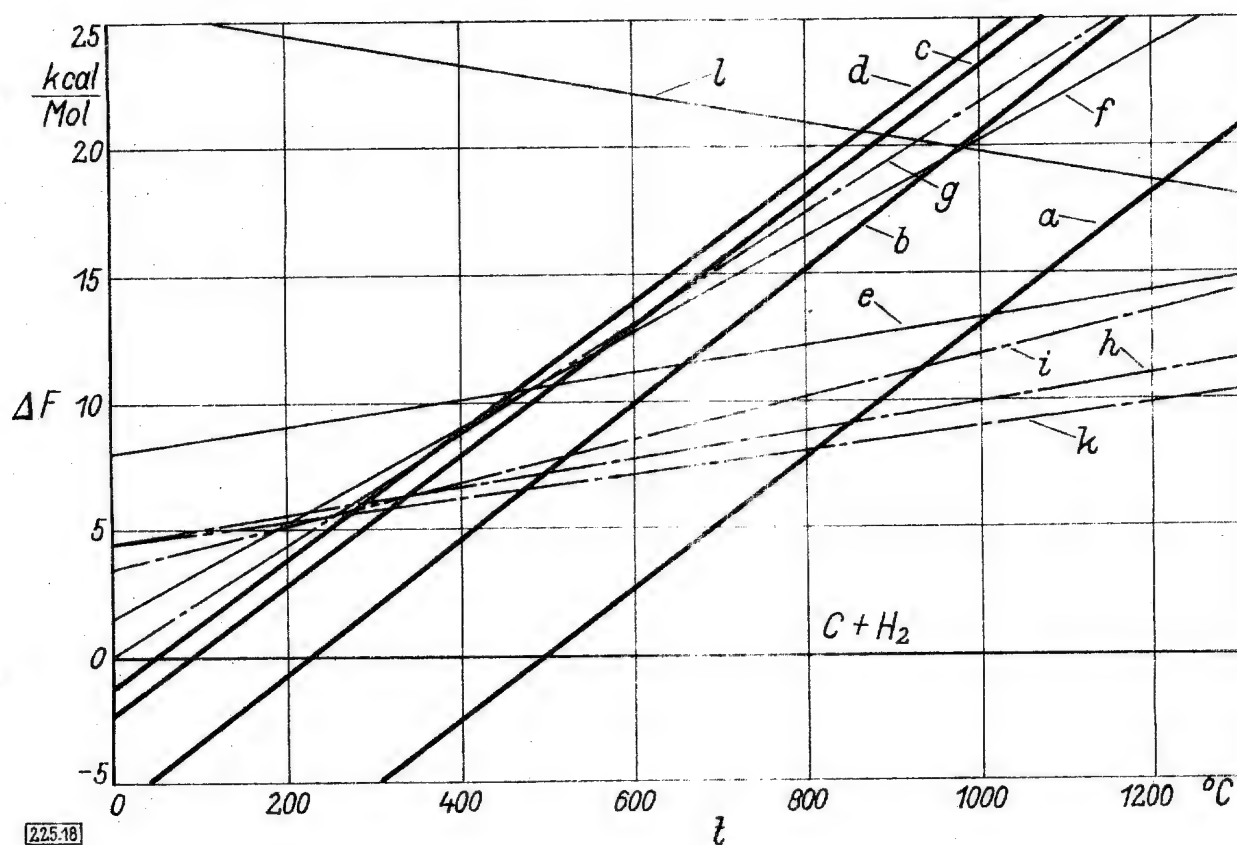


Abb. 19  
Рис. 19





225.18

Abb. 18  
Рис. 18

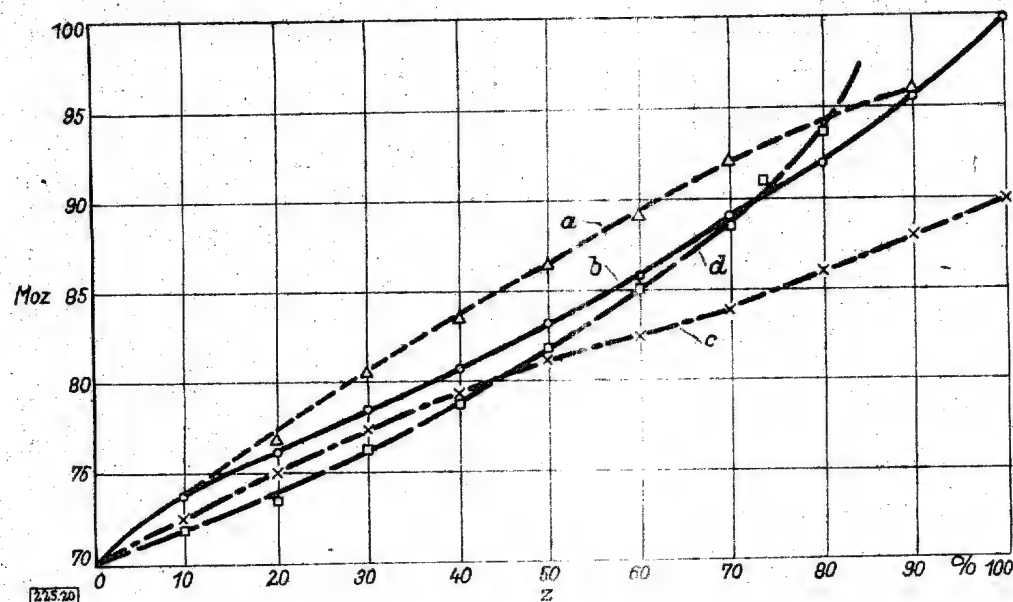


Abb. 20  
Pnc. 20

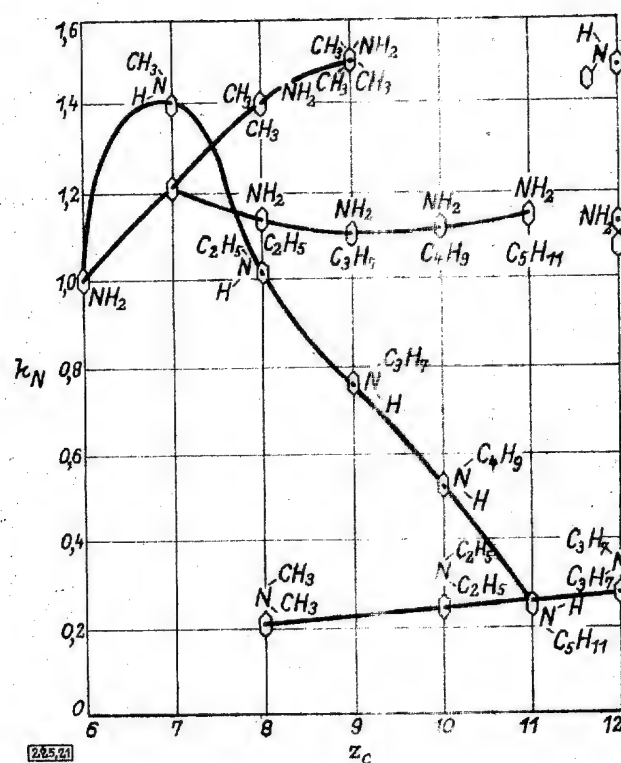


Abb. 21  
Pnc. 21

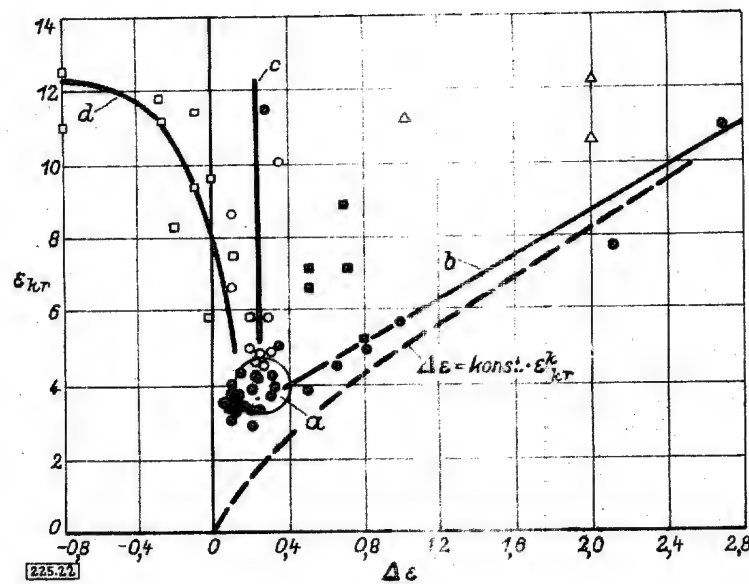


Abb. 22  
Рис. 22

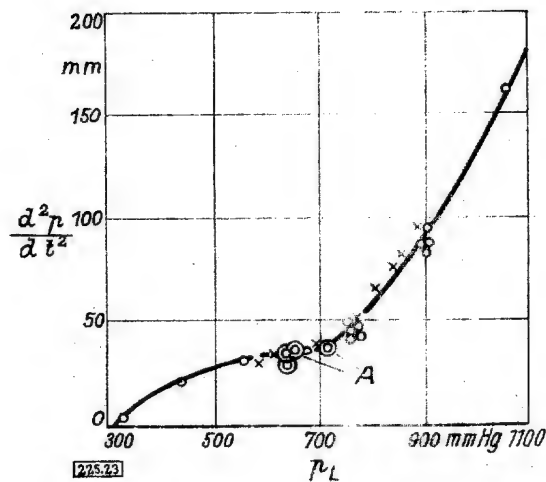
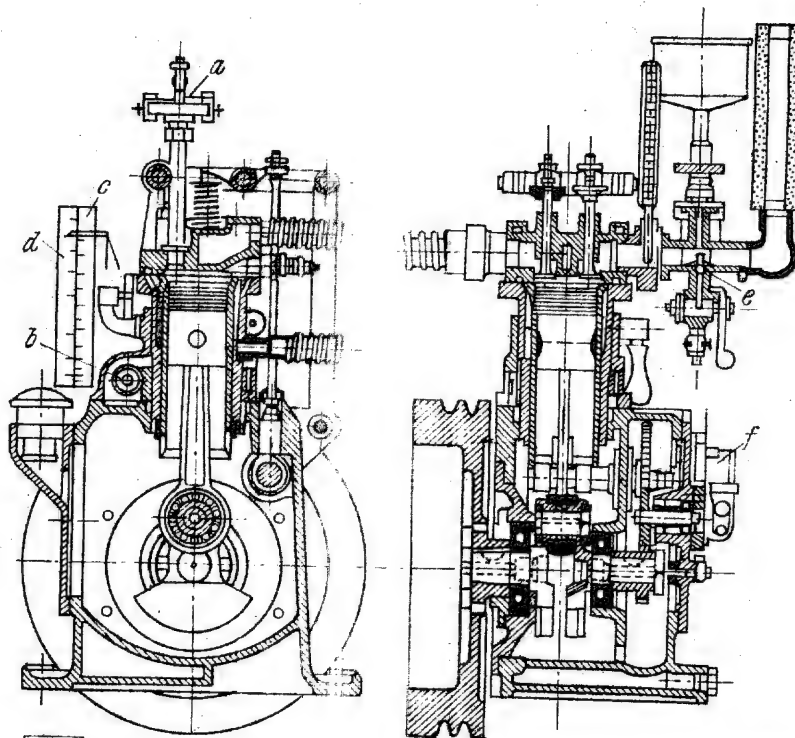


Abb. 23  
Рис. 23

225/24 S.114



225.24

Abb. 24 Рис. 24

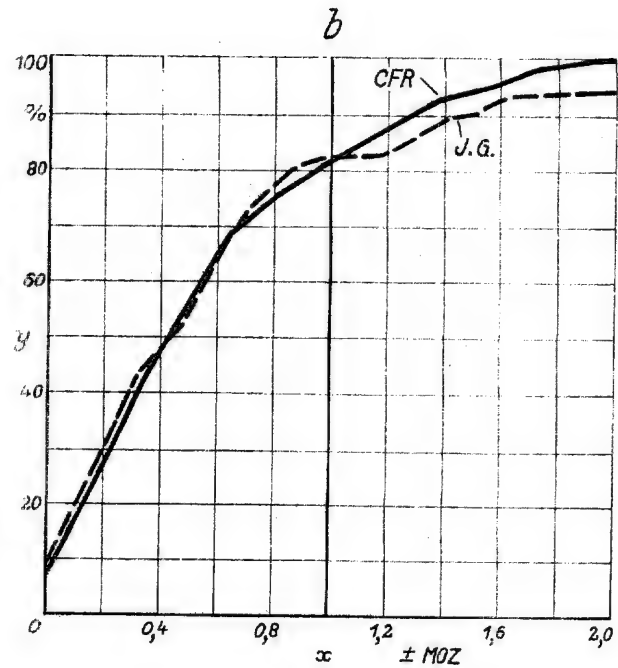
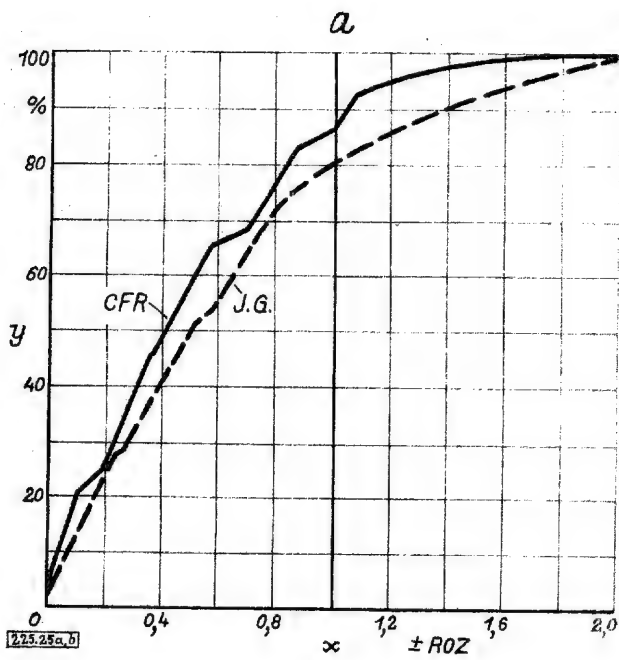


Abb. 25  
Рис. 25



225/26 S.116

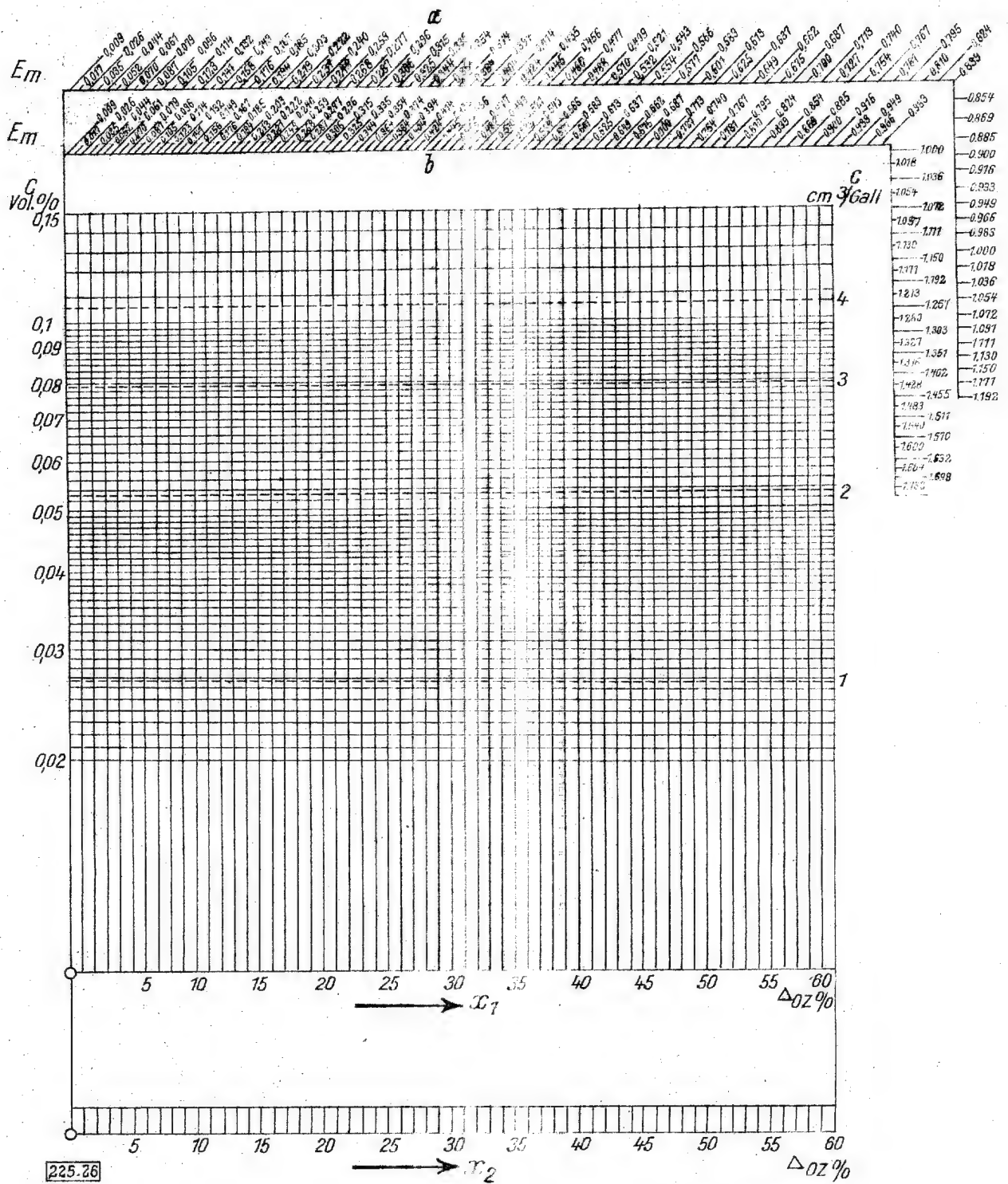


Abb.26 Рис.26

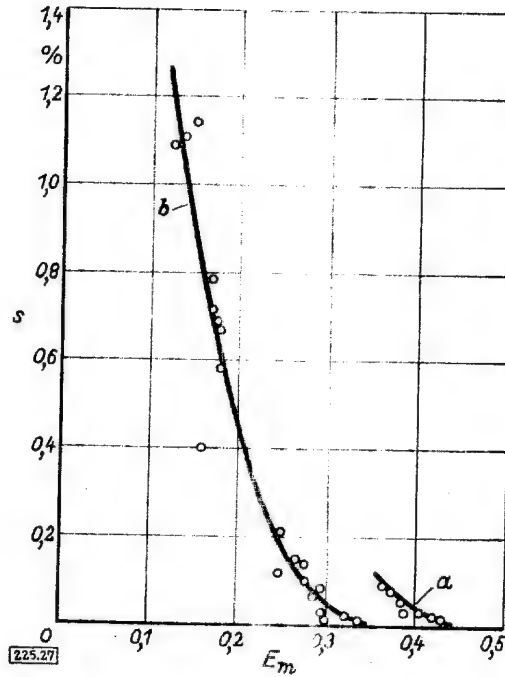


Abb. 27  
Рис. 27

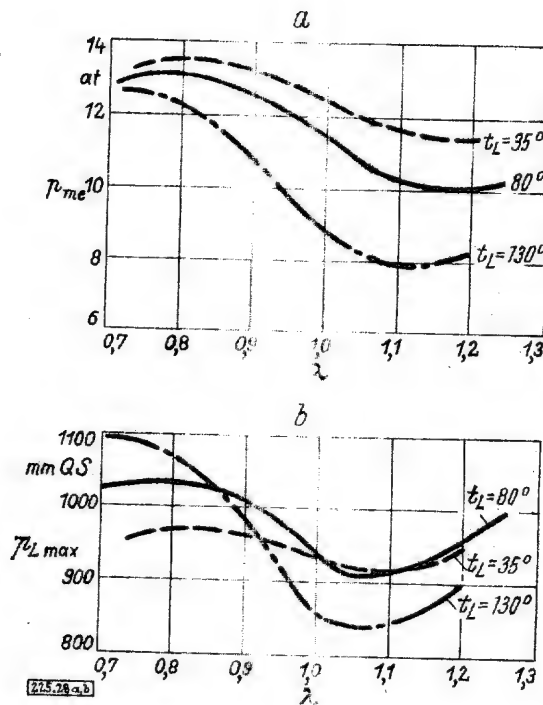
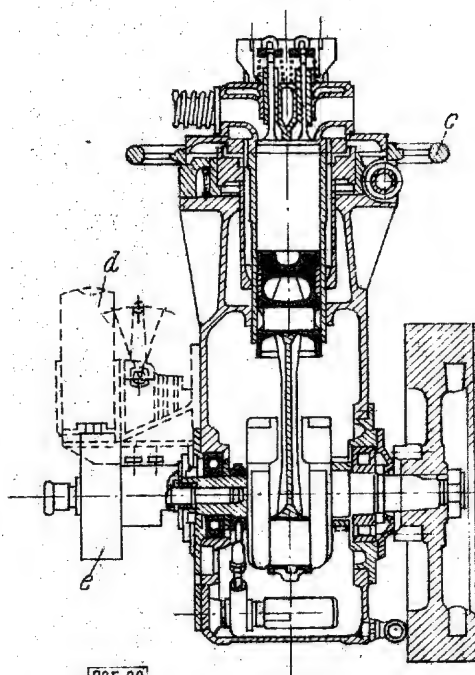


Abb. 28  
Рис. 28

225/29 S.118



225.29

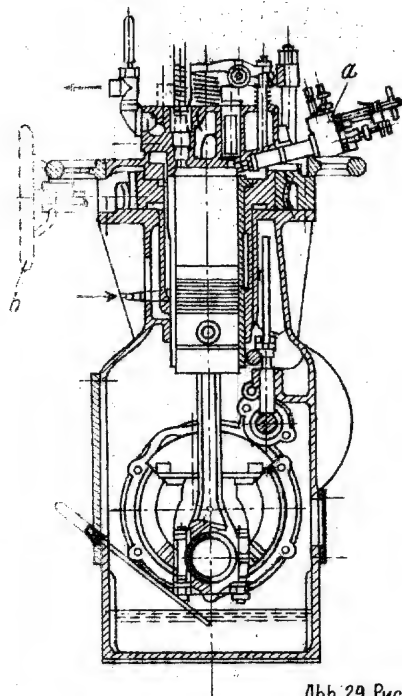


Abb.29 Рис.29

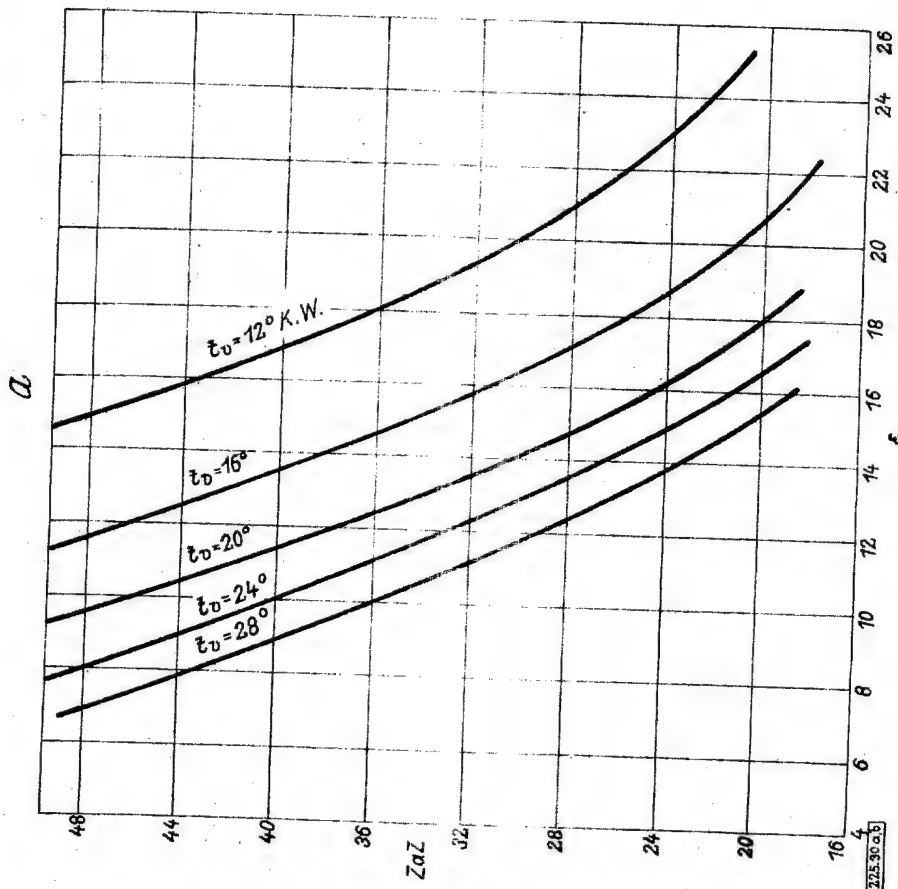
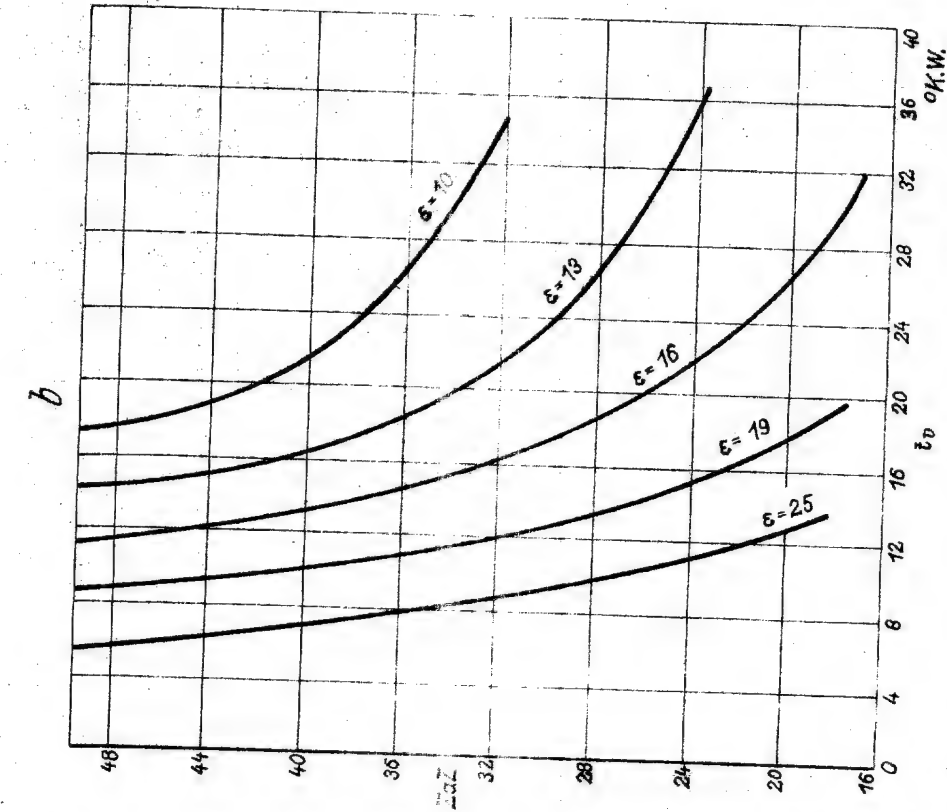


Abb. 30 Рис. 30

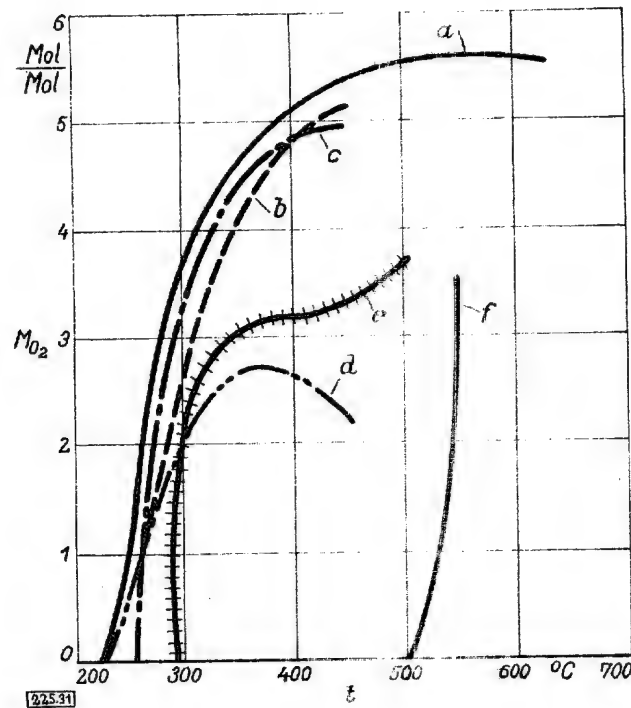


Abb. 31  
Рис. 31

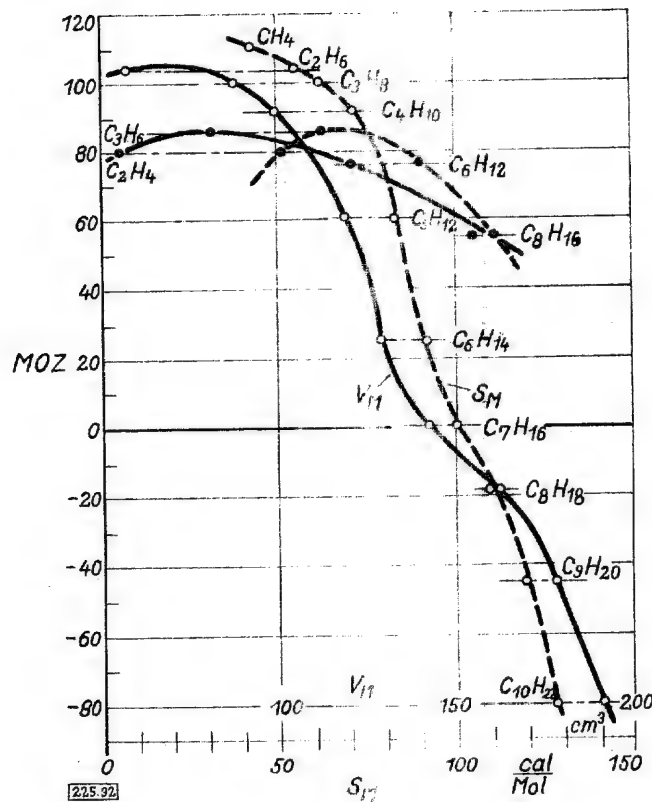
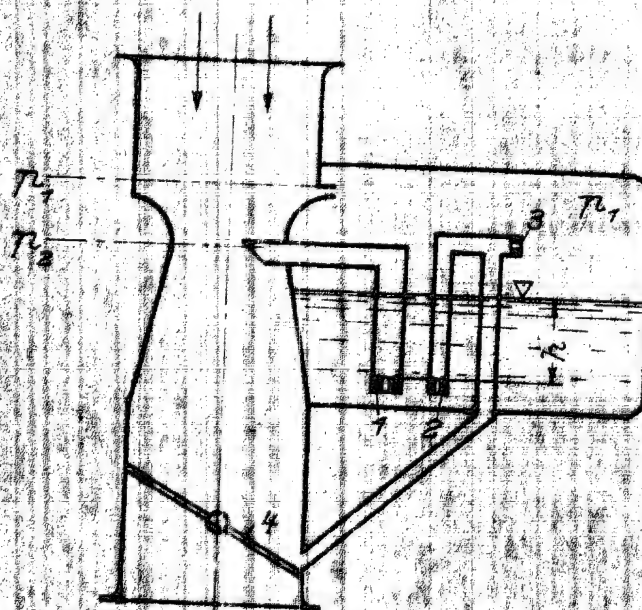
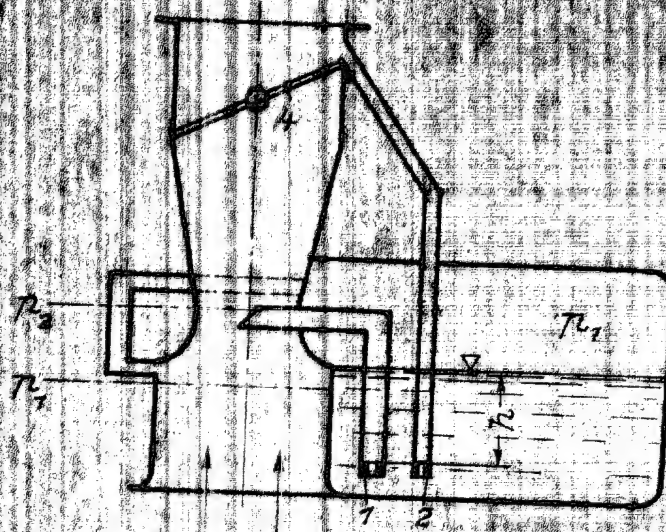


Abb. 32  
Рис. 32





230.1

Abb.1 Рис.1

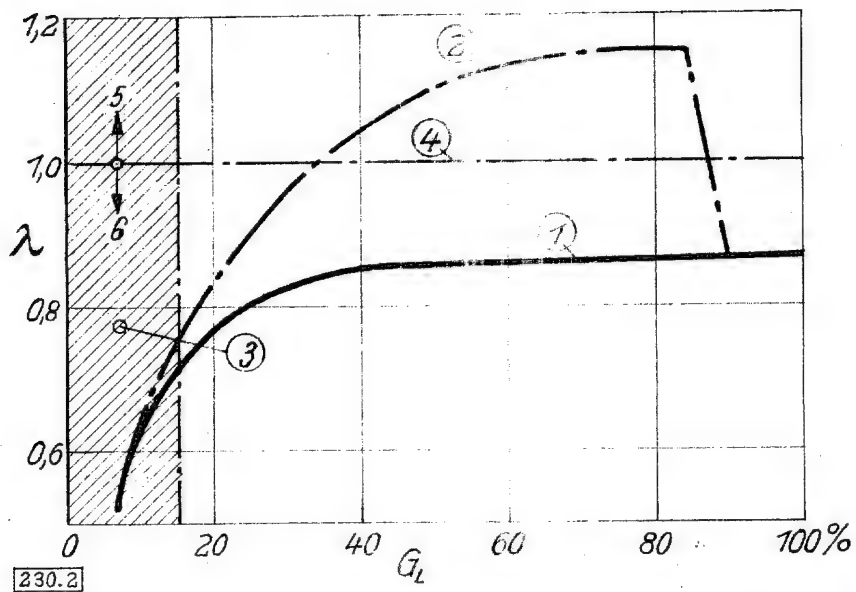


Abb.2 Рис.2

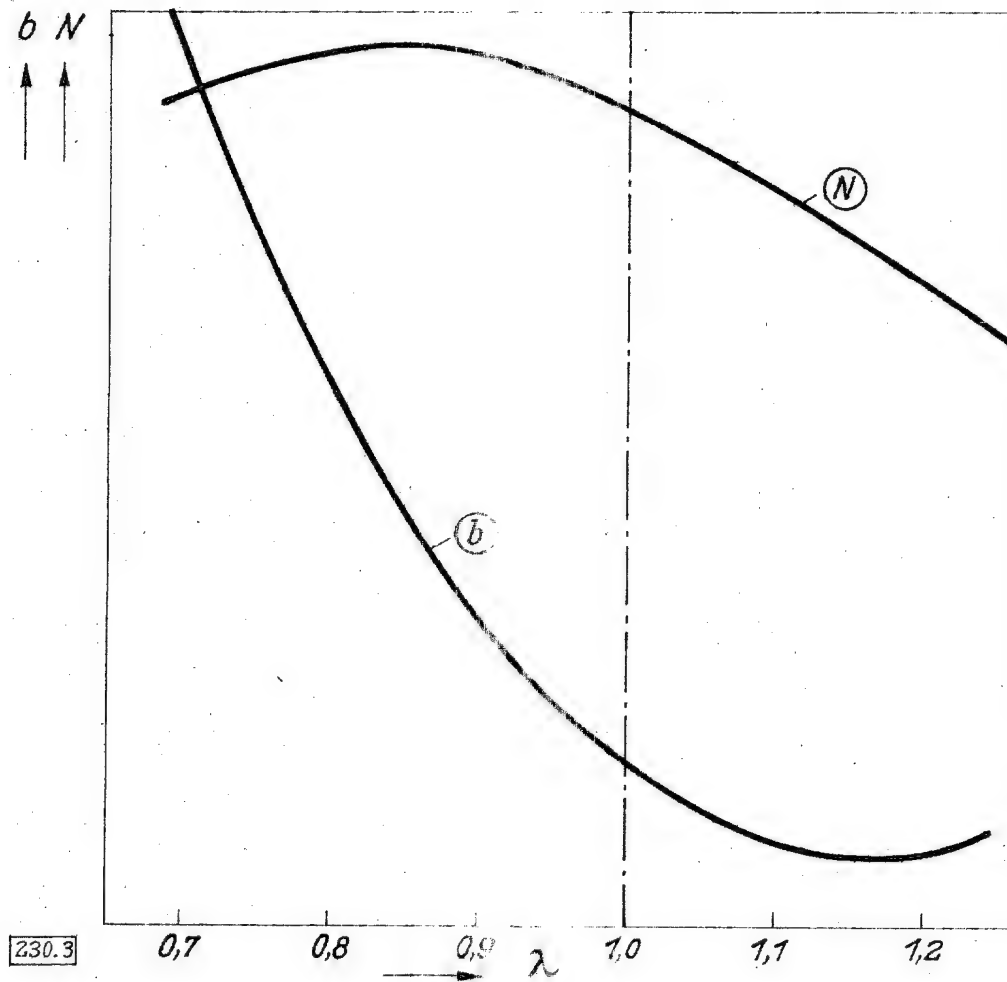


Abb.3 Рис.3

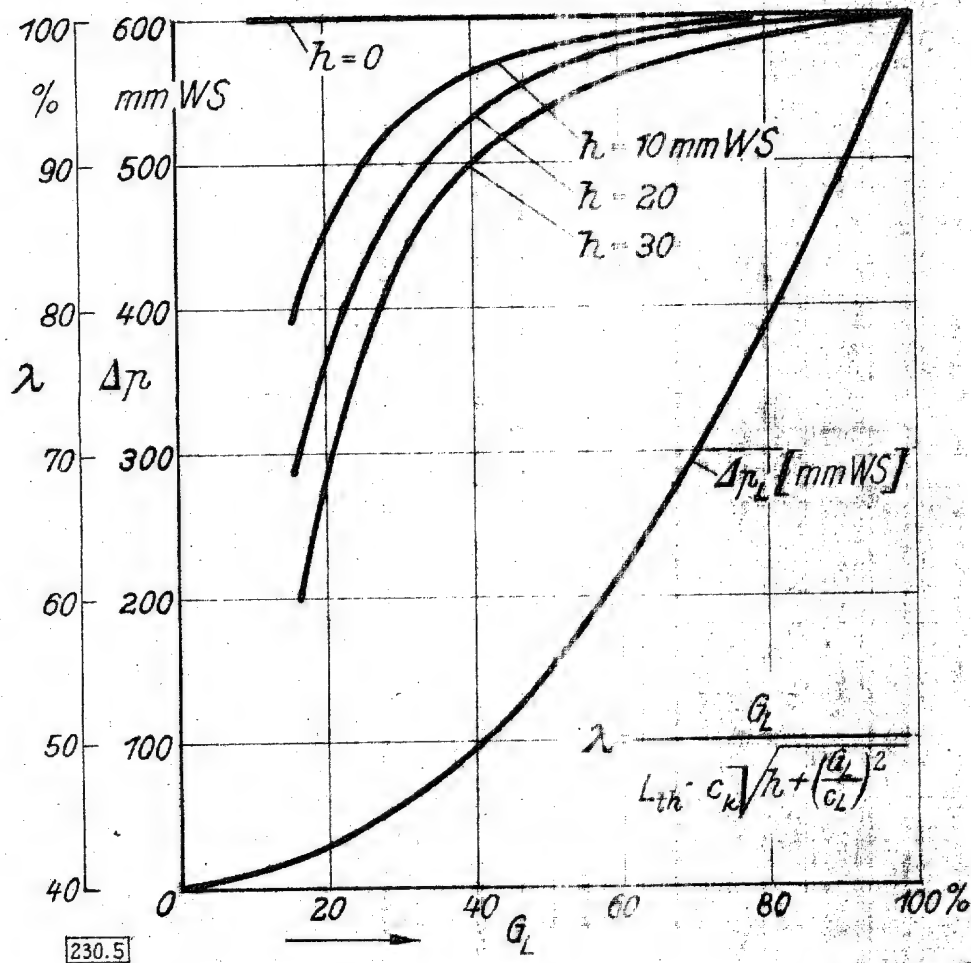


Abb. 5. Рис. 5

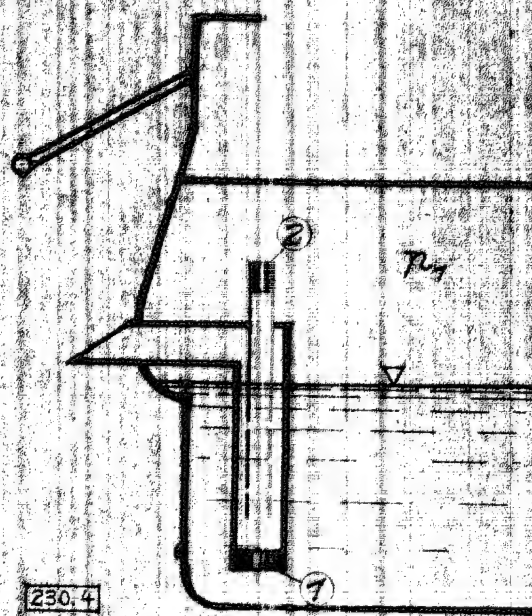


Abb. 4 Pnc. 4

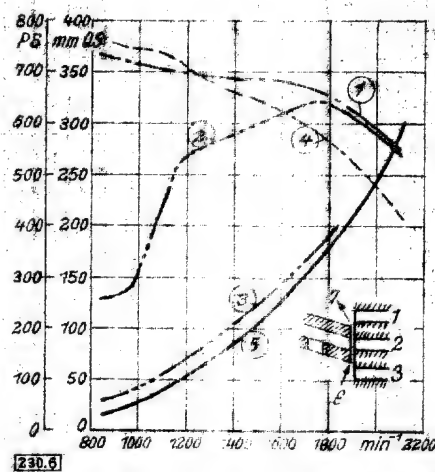


Abb. 6 Pnc. 6



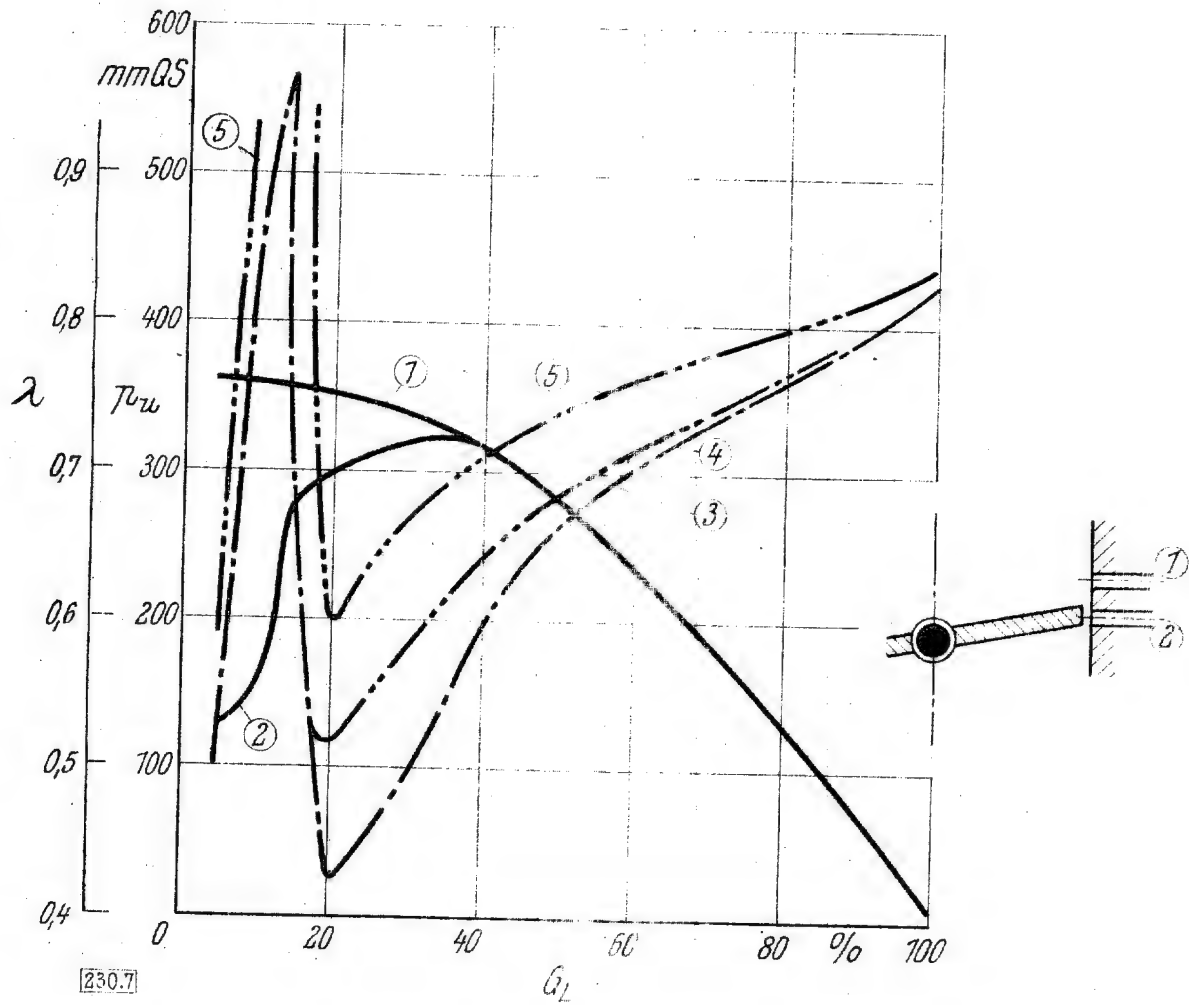


Abb. 7  
Рис. 7

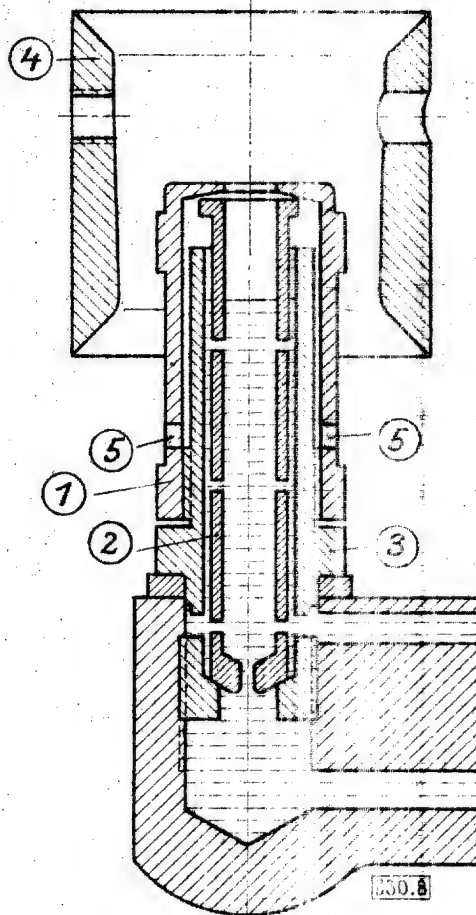


Abb. 8  
Рис. 8

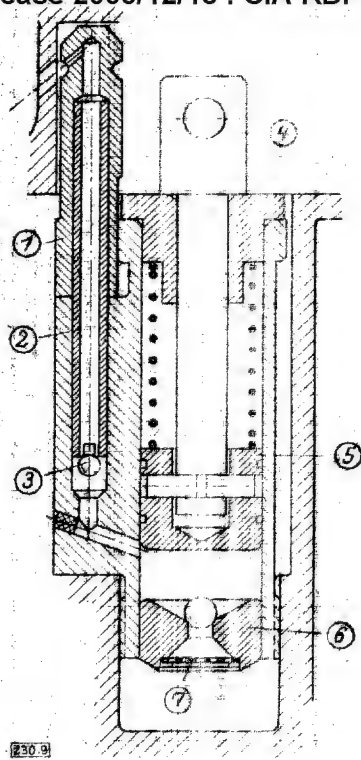
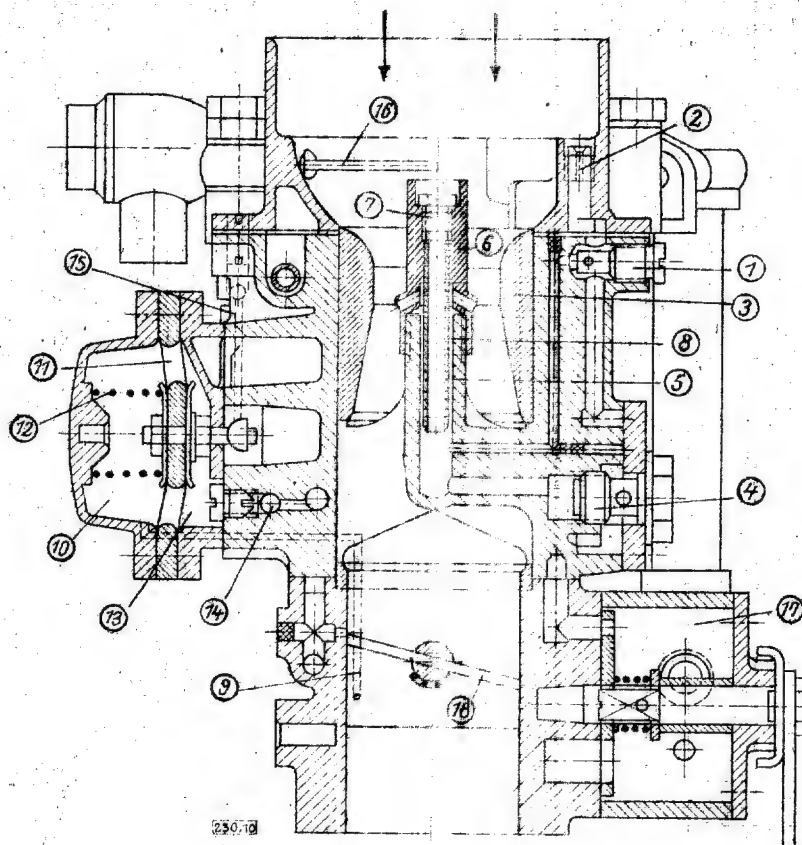


Abb.9 Рис.9



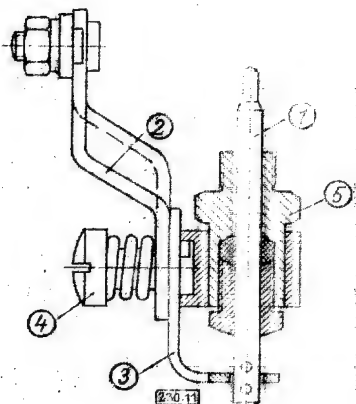


Abb. 11 Fig. 11

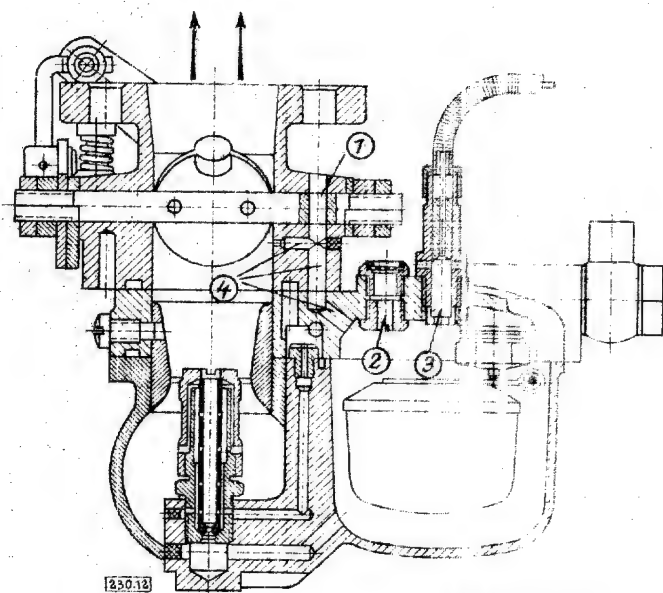
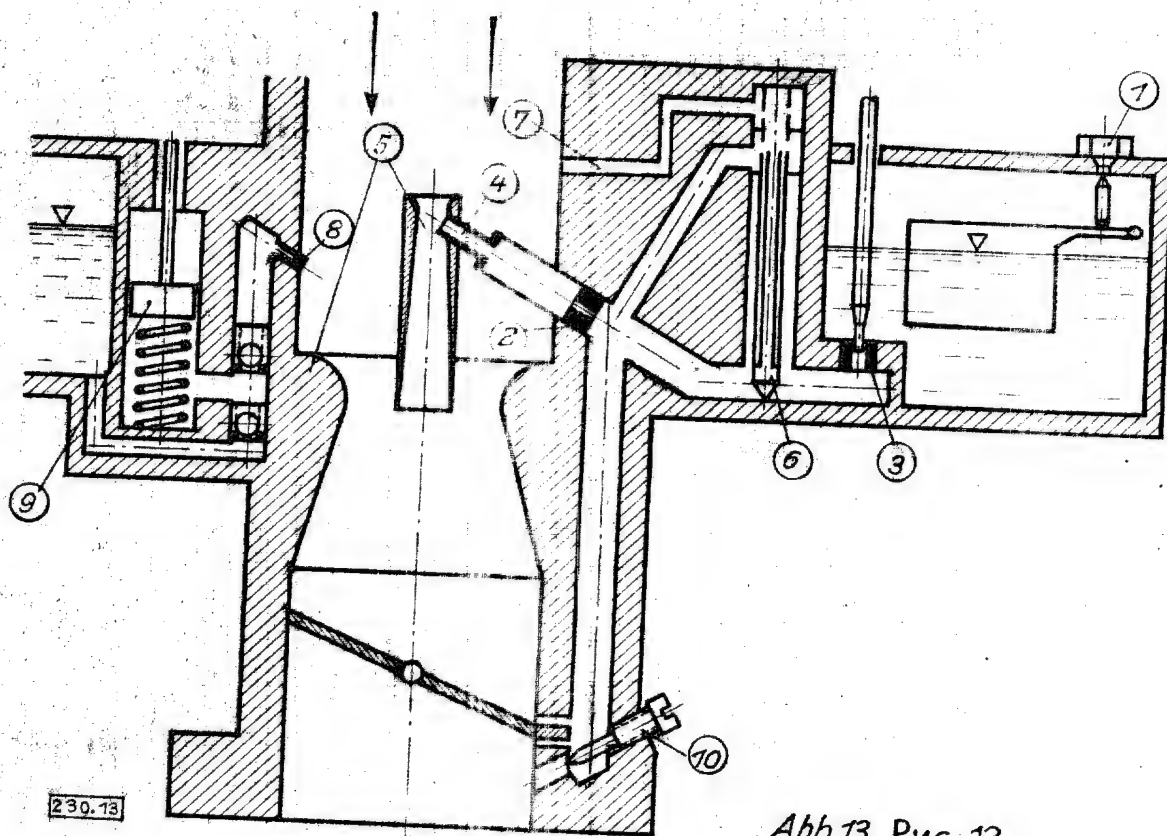


Abb. 12 Fig. 12





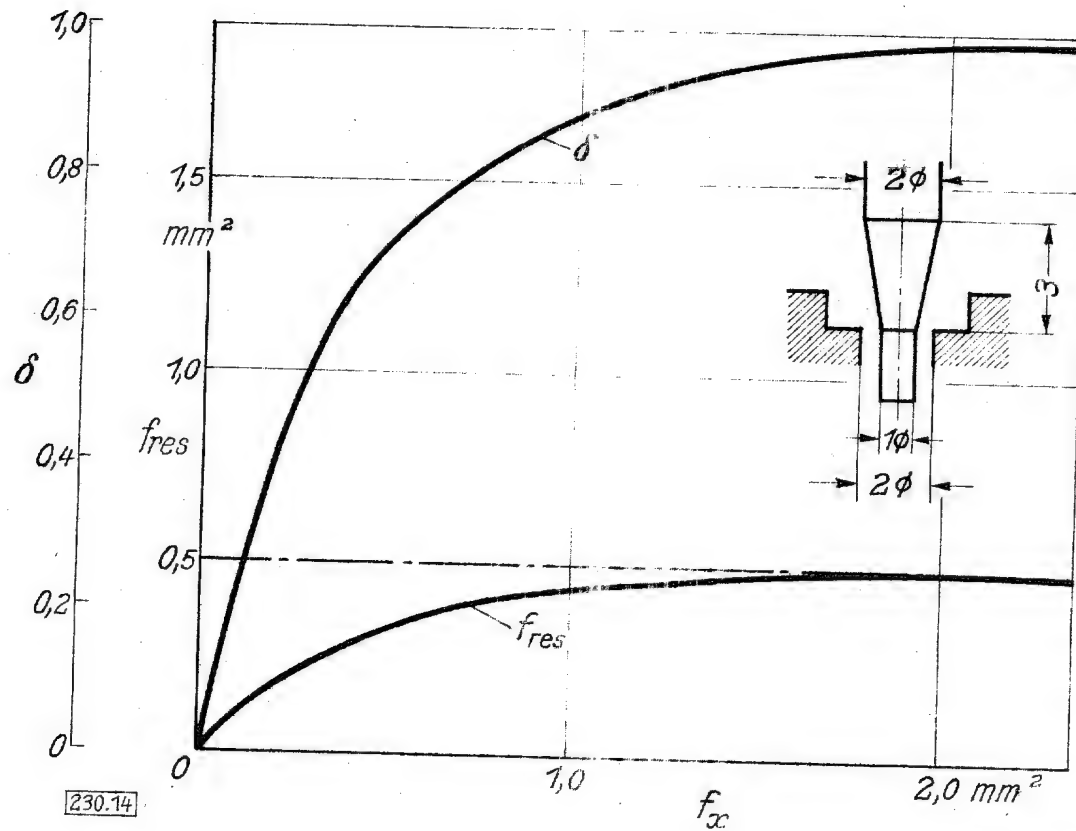


Abb. 14 Рис. 14

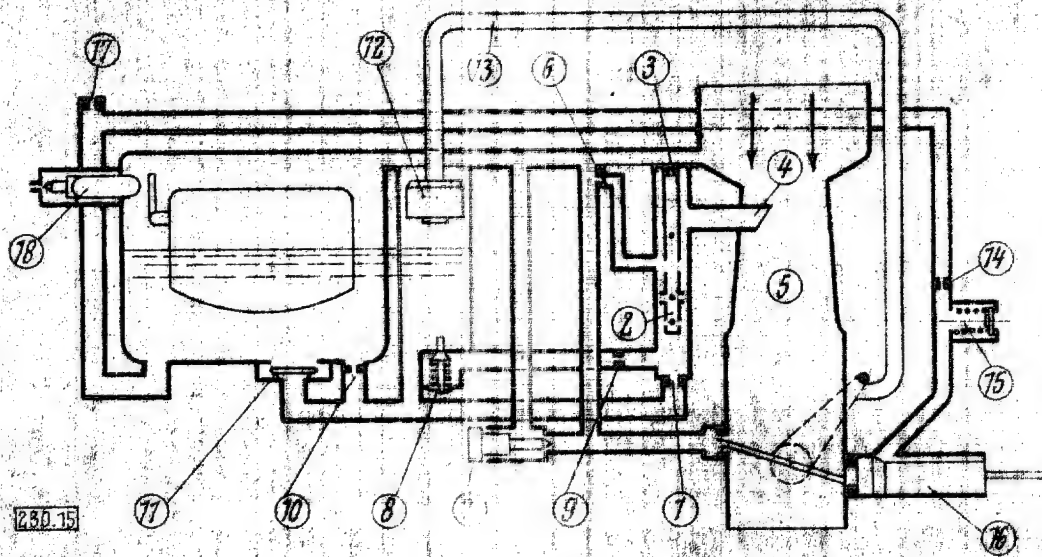
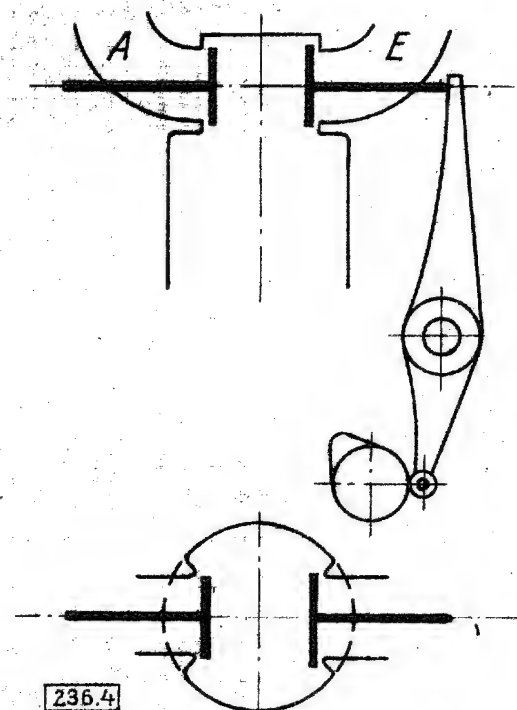
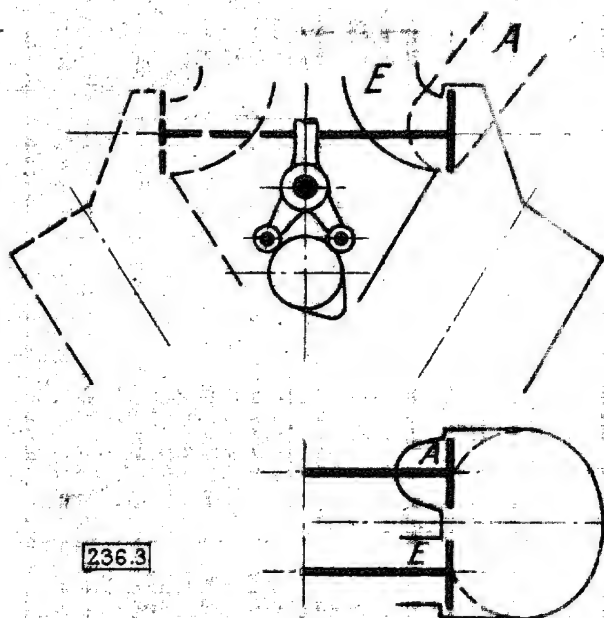
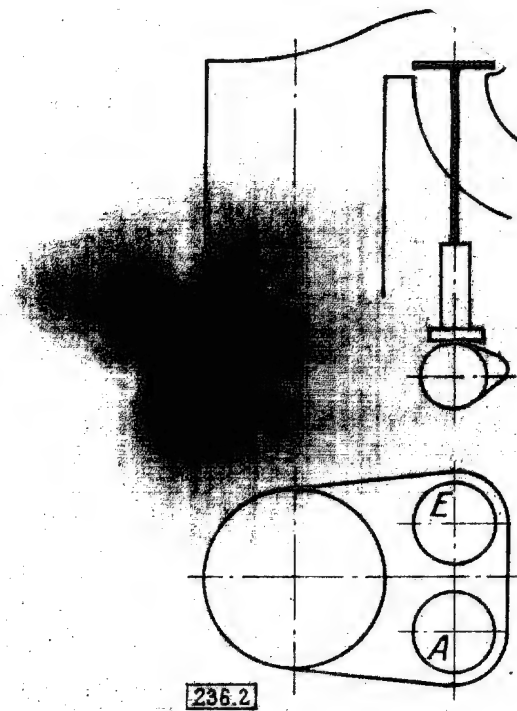
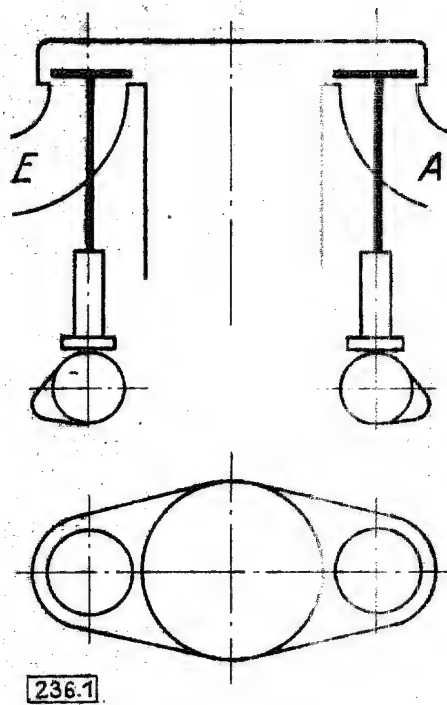
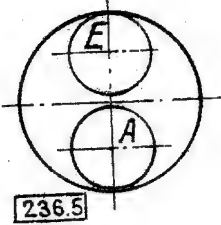
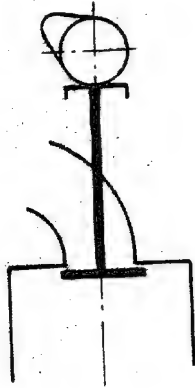
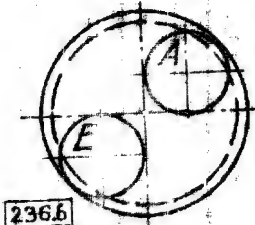
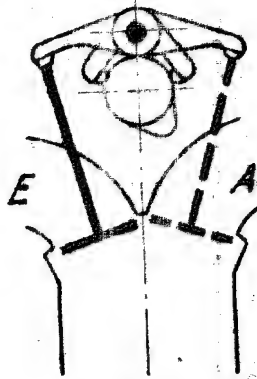


Abb. 15  
Рис. 15

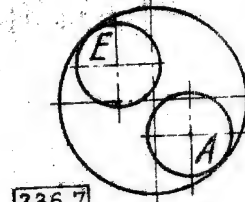
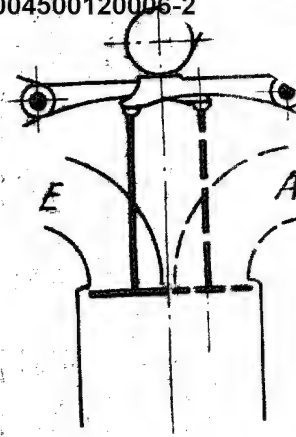




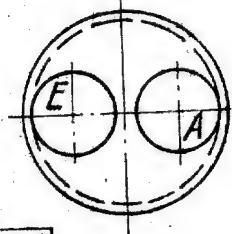
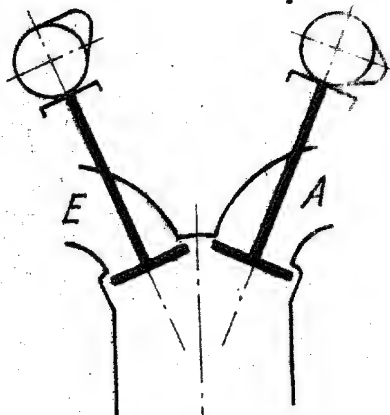
236.5



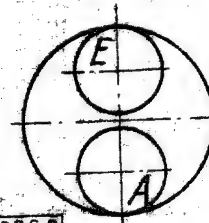
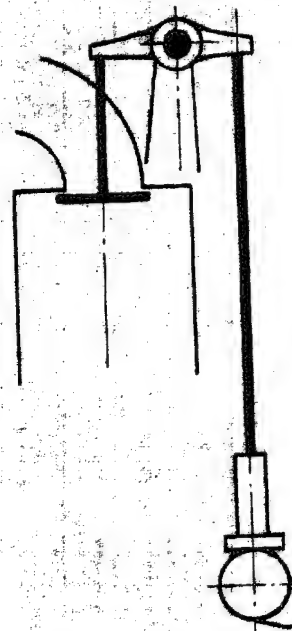
236.6



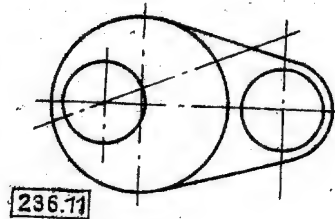
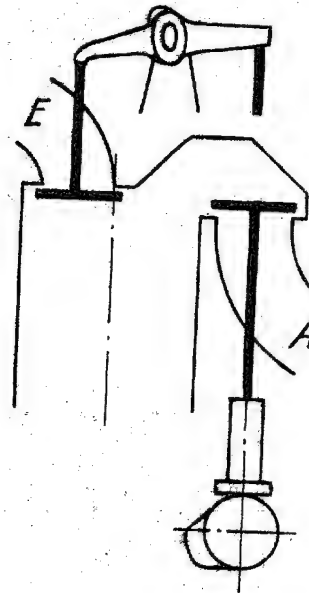
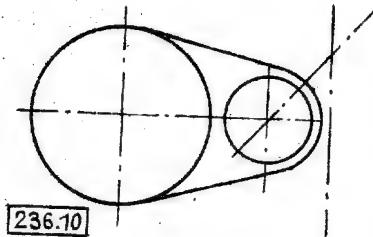
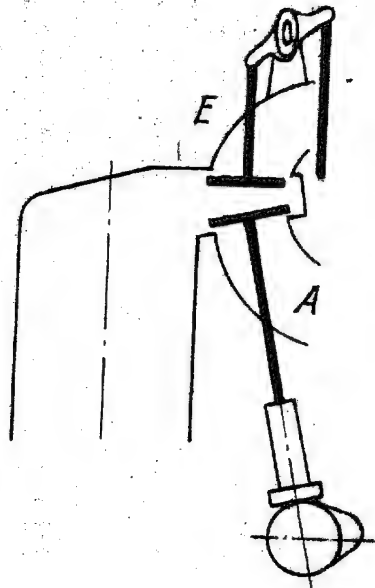
236.7



236.8

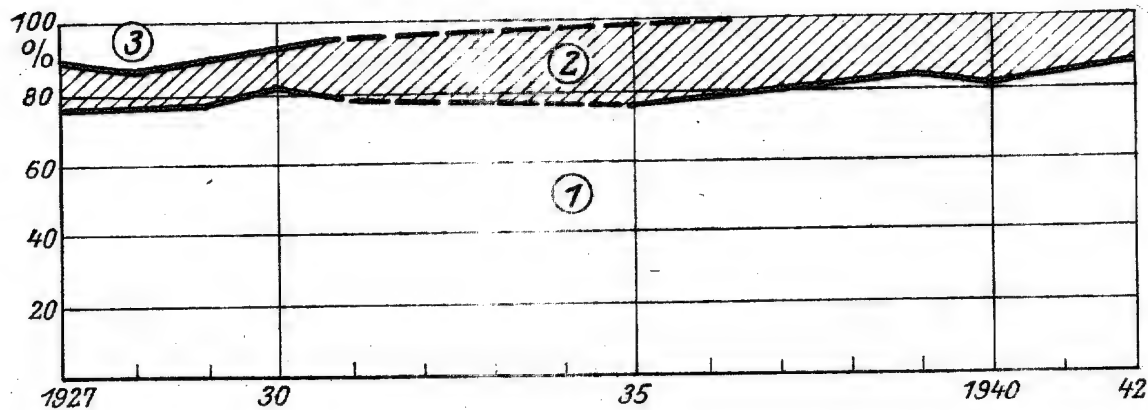


236.9

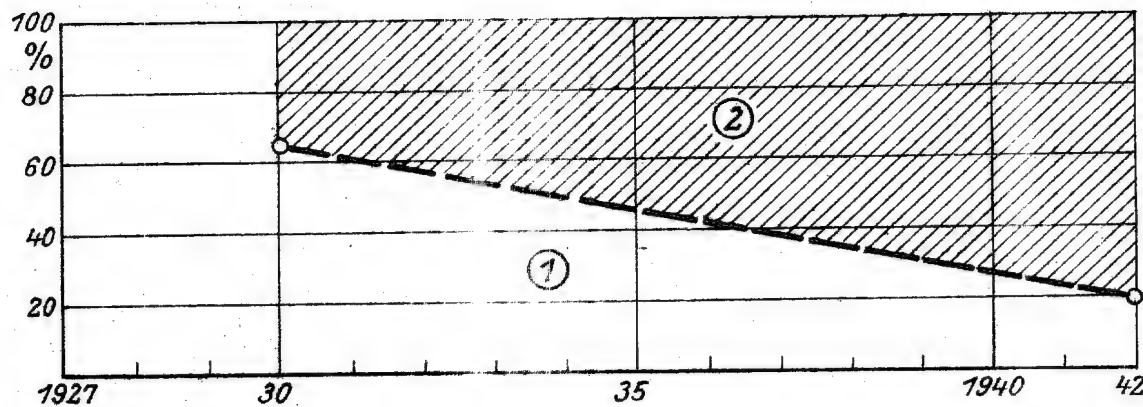




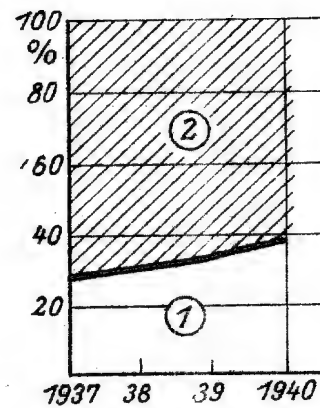
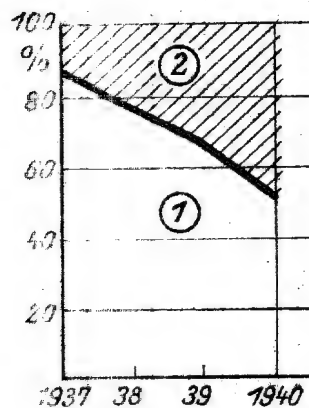
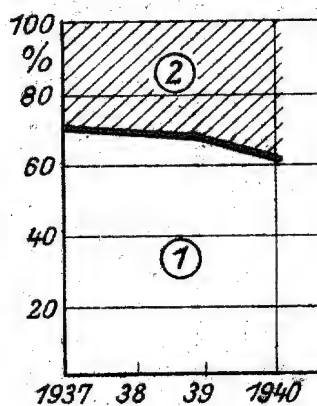
I

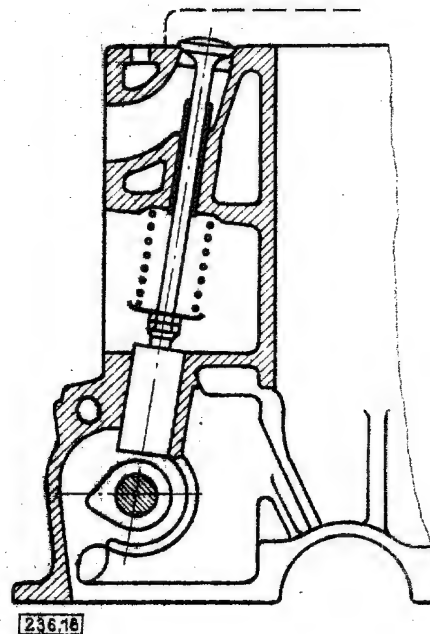
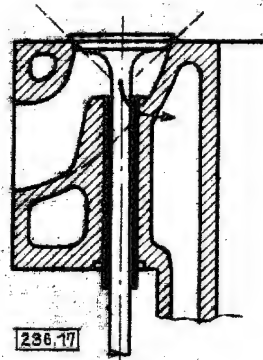
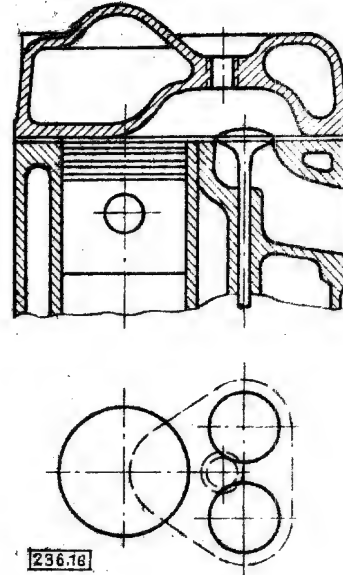
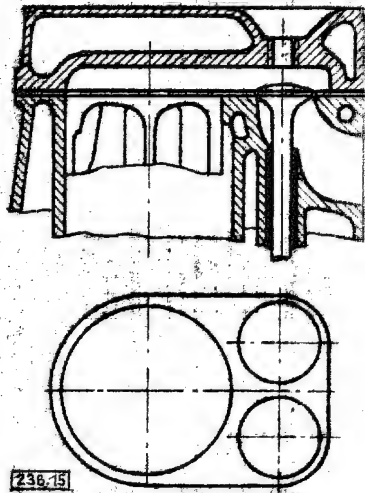
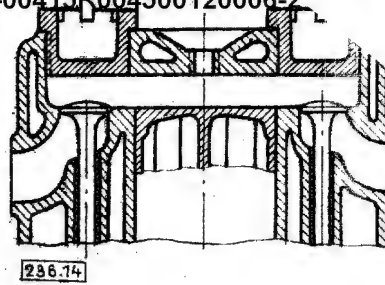
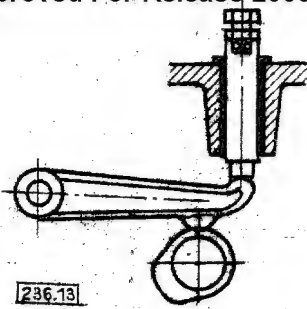


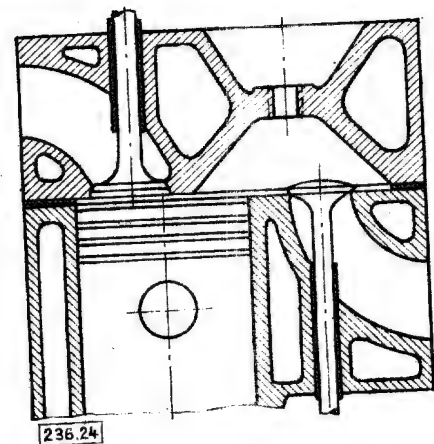
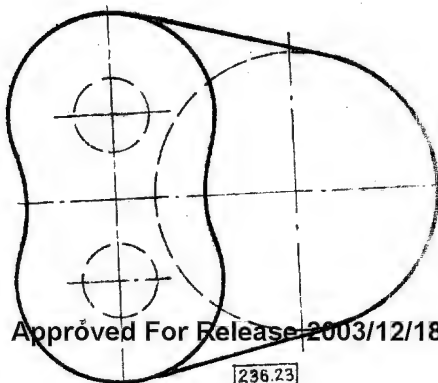
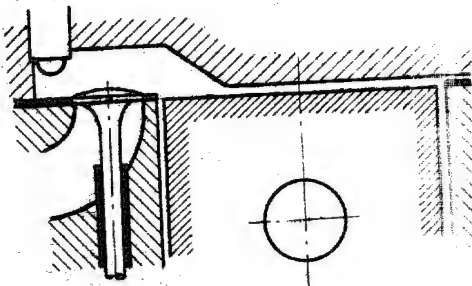
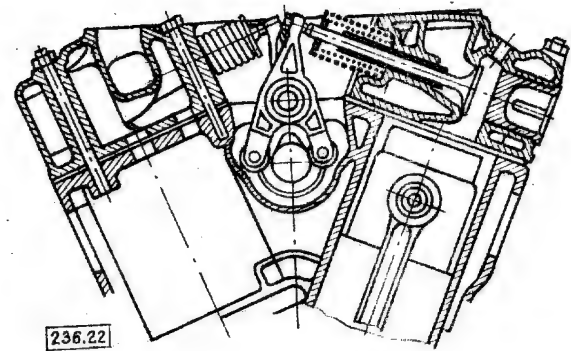
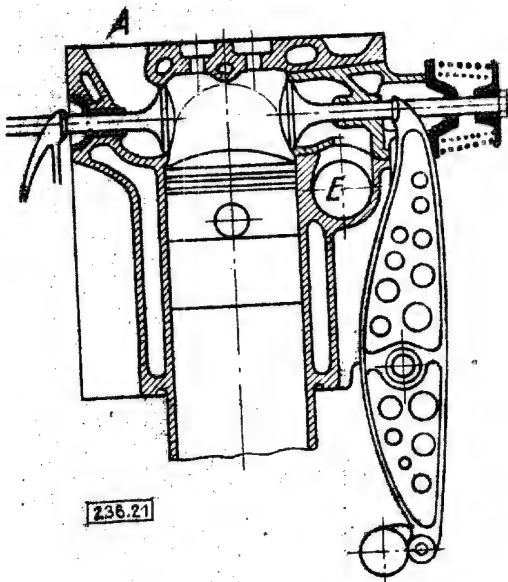
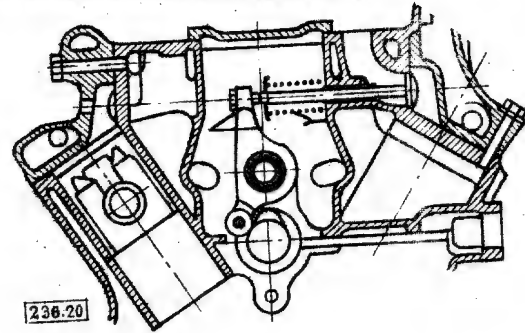
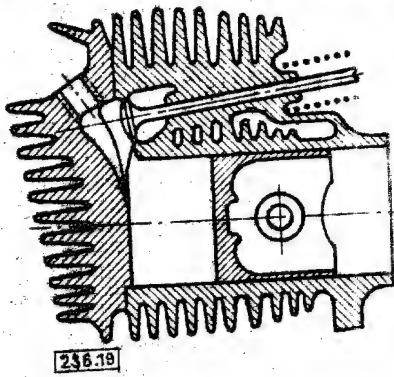
II

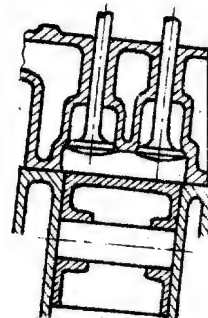
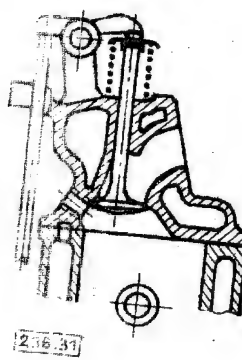
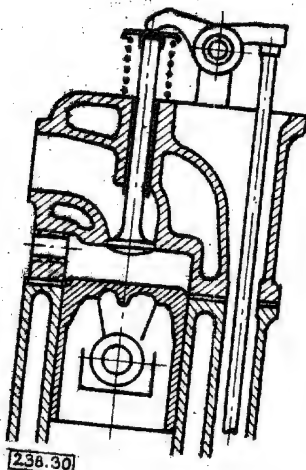
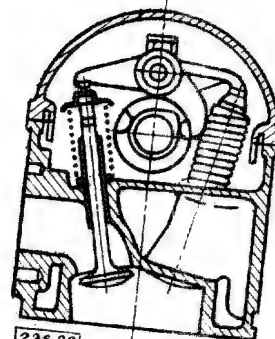
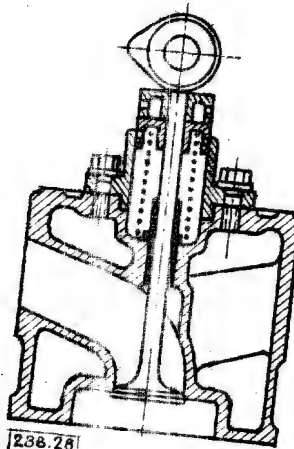
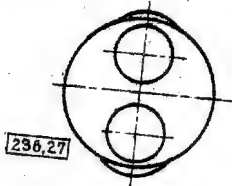
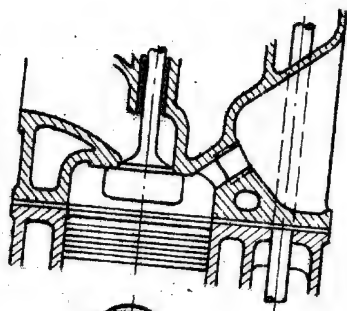
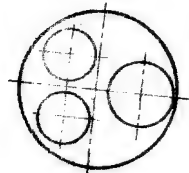
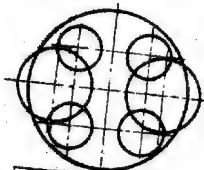
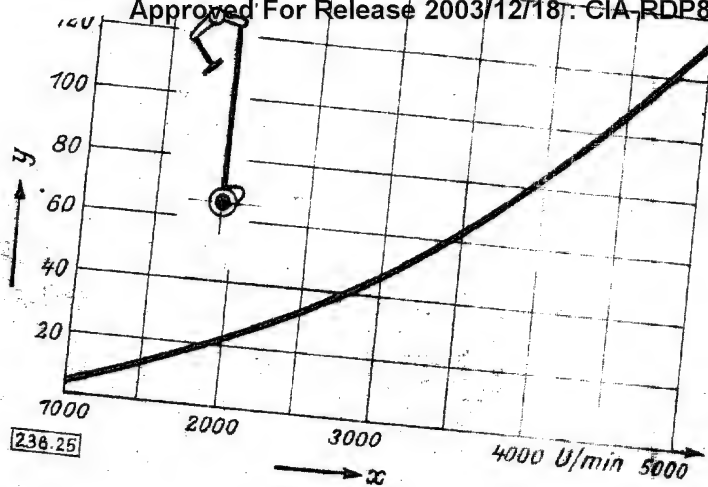


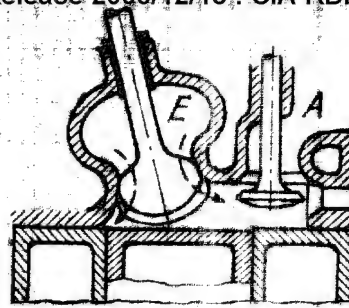
III



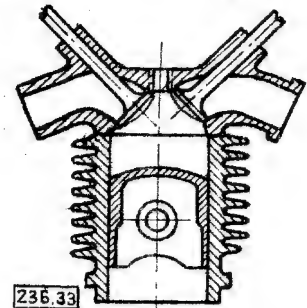




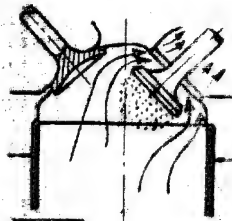




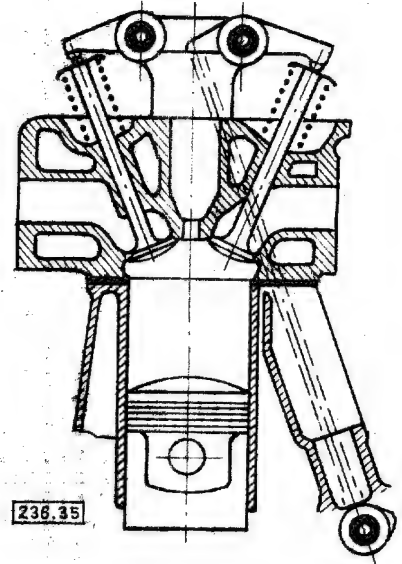
236.32



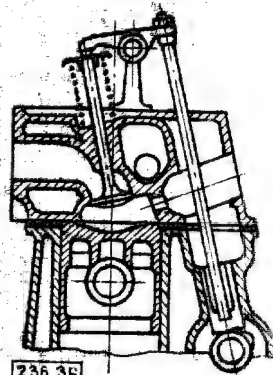
236.33



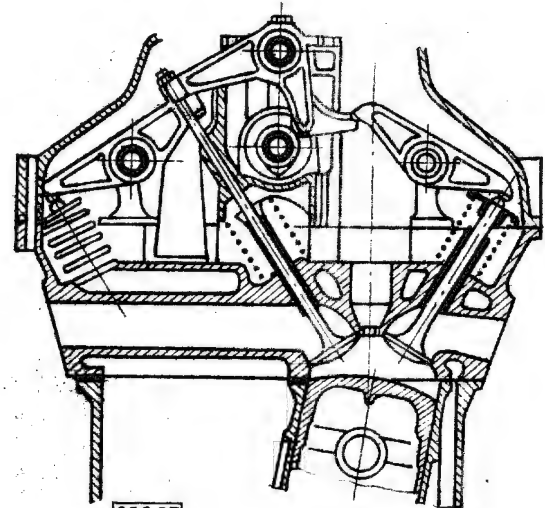
236.34



236.35

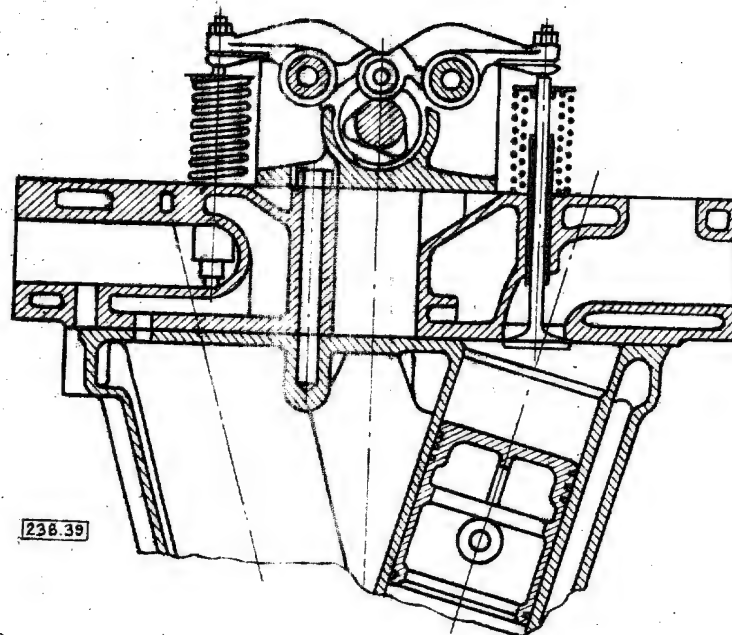
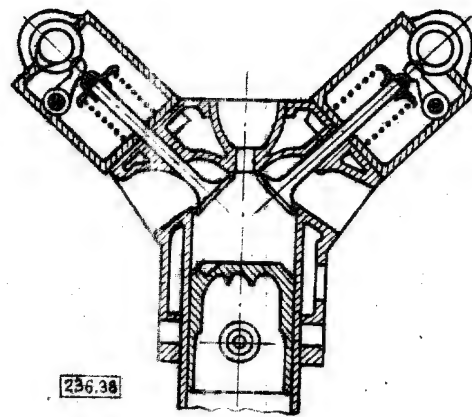


236.36



236.37





Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

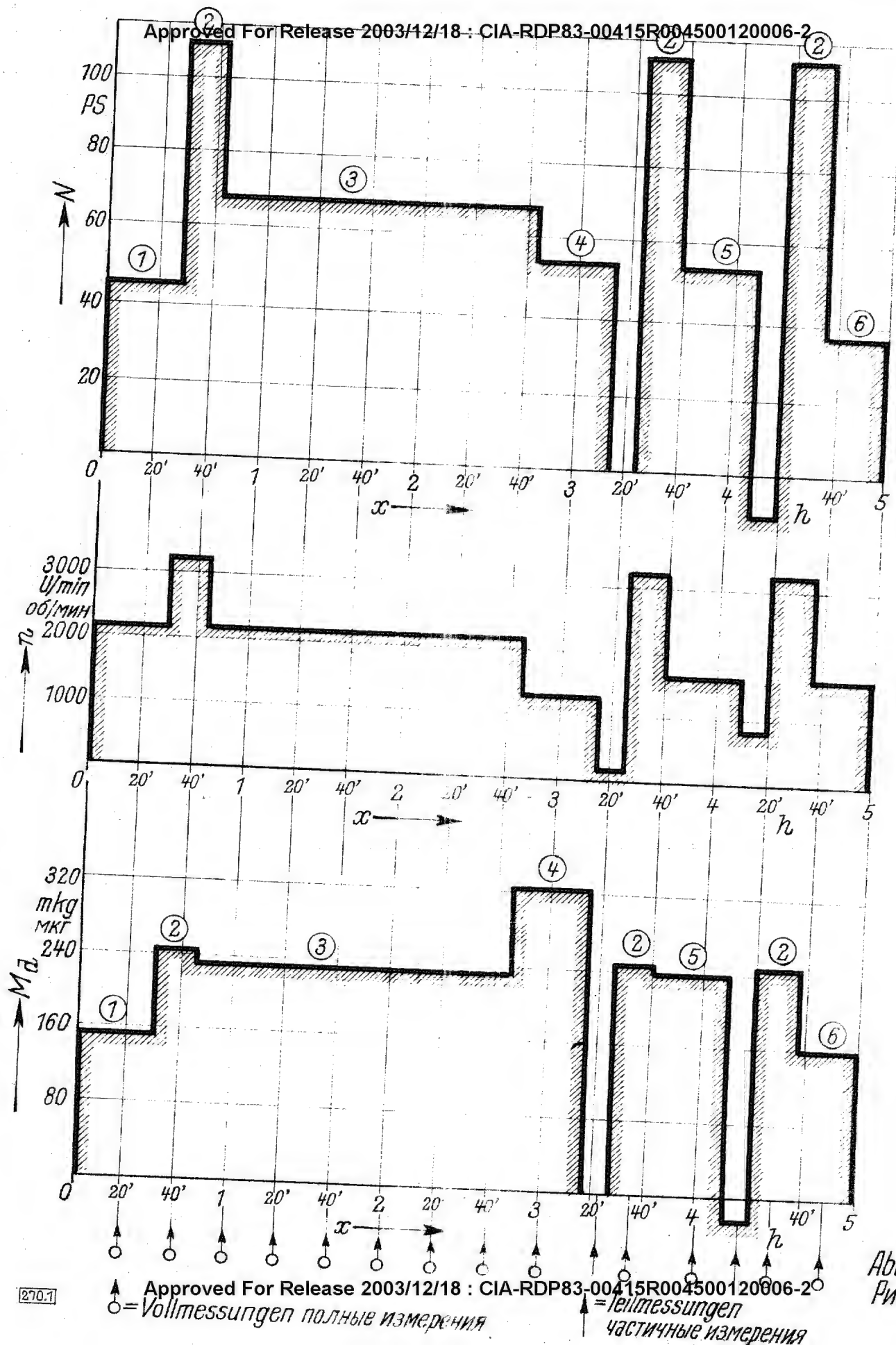


Abb.1  
Рис.1

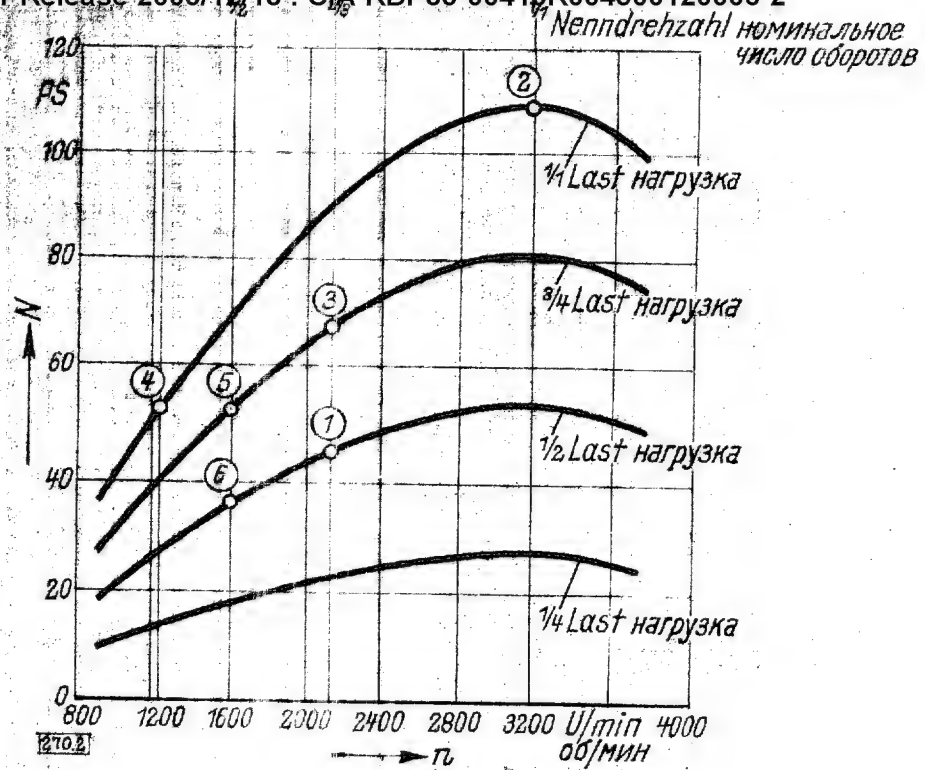


Abb.2 Рис.2

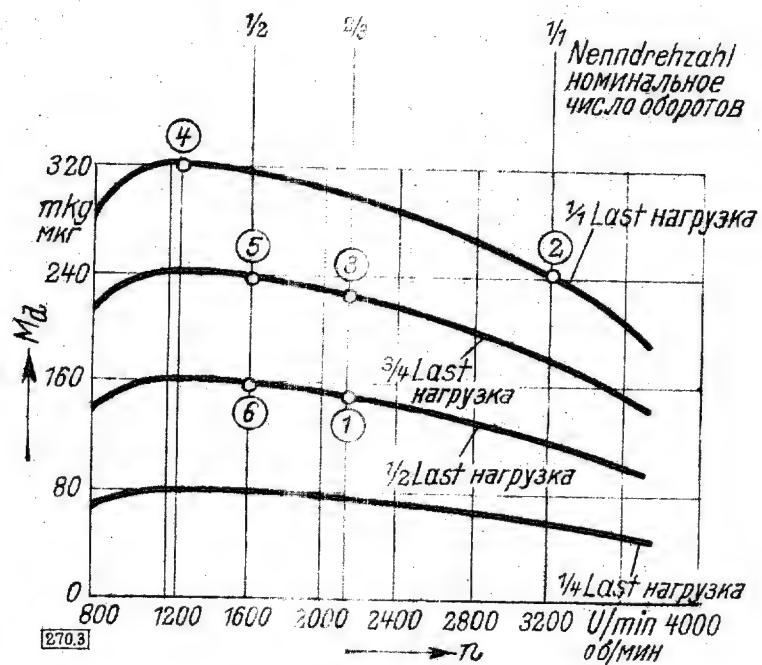


Abb.3 Рис.3

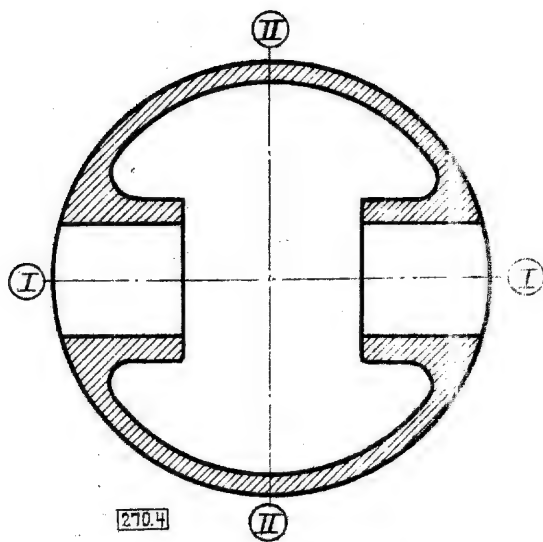
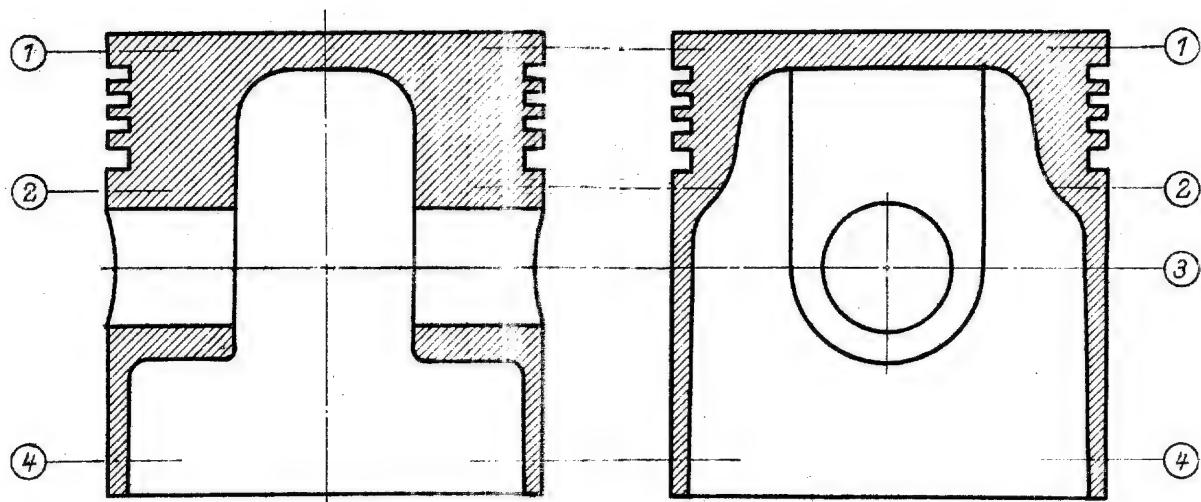


Abb. 4 Рис. 4

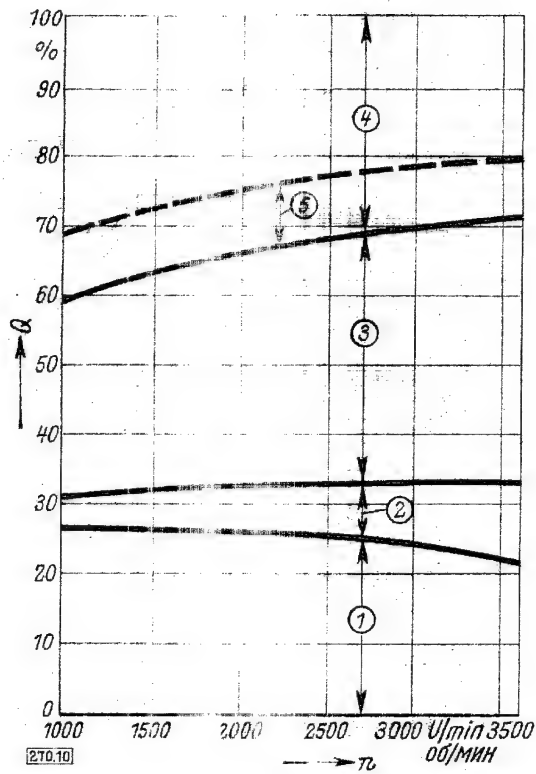


Abb.10 Рис.10

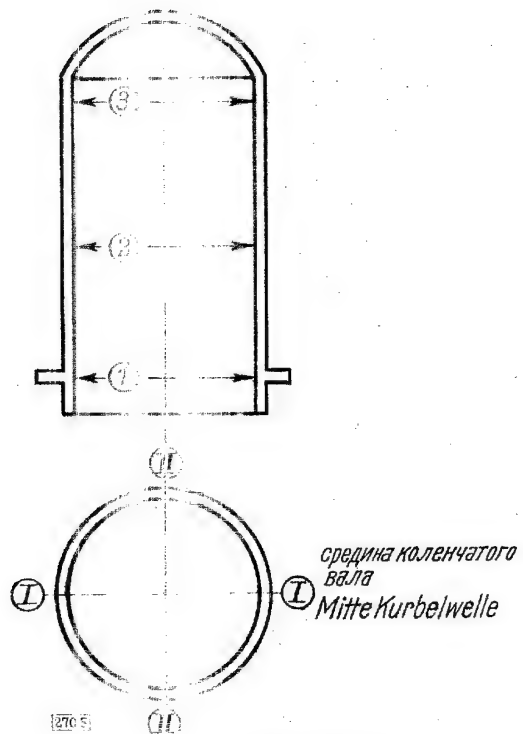


Abb.5 Рис.5



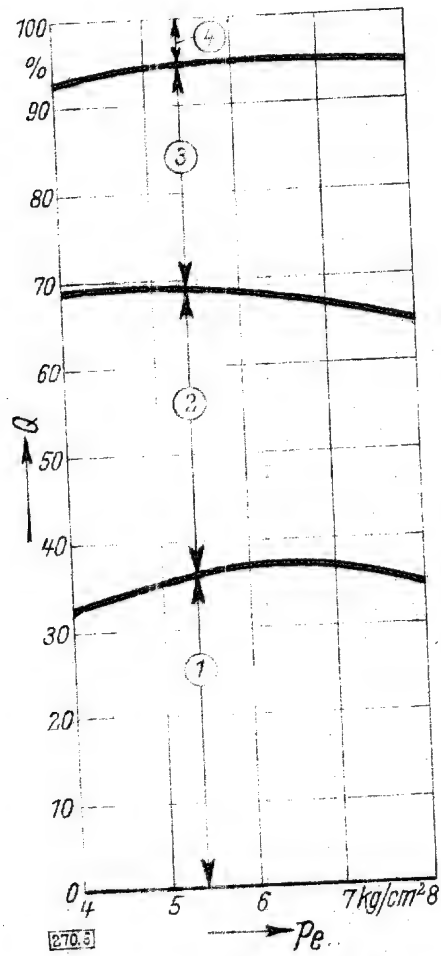


Abb.6 Рис.6

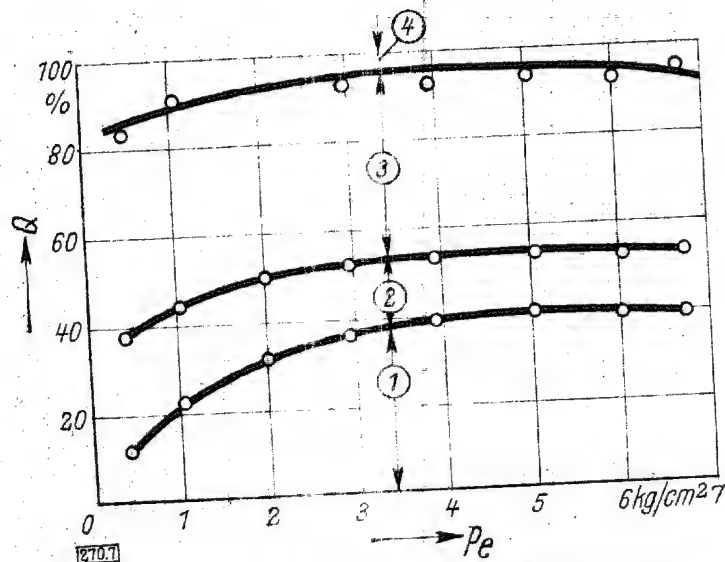


Abb.7 Рис.7

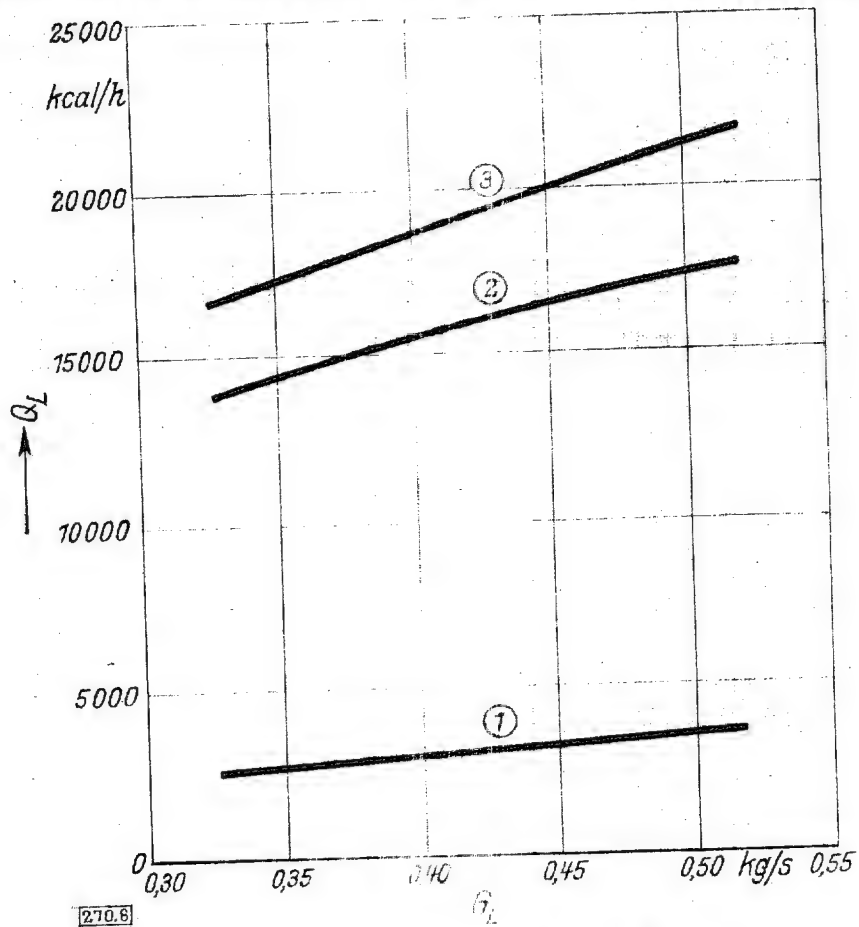


Abb. 8 Рис. 8

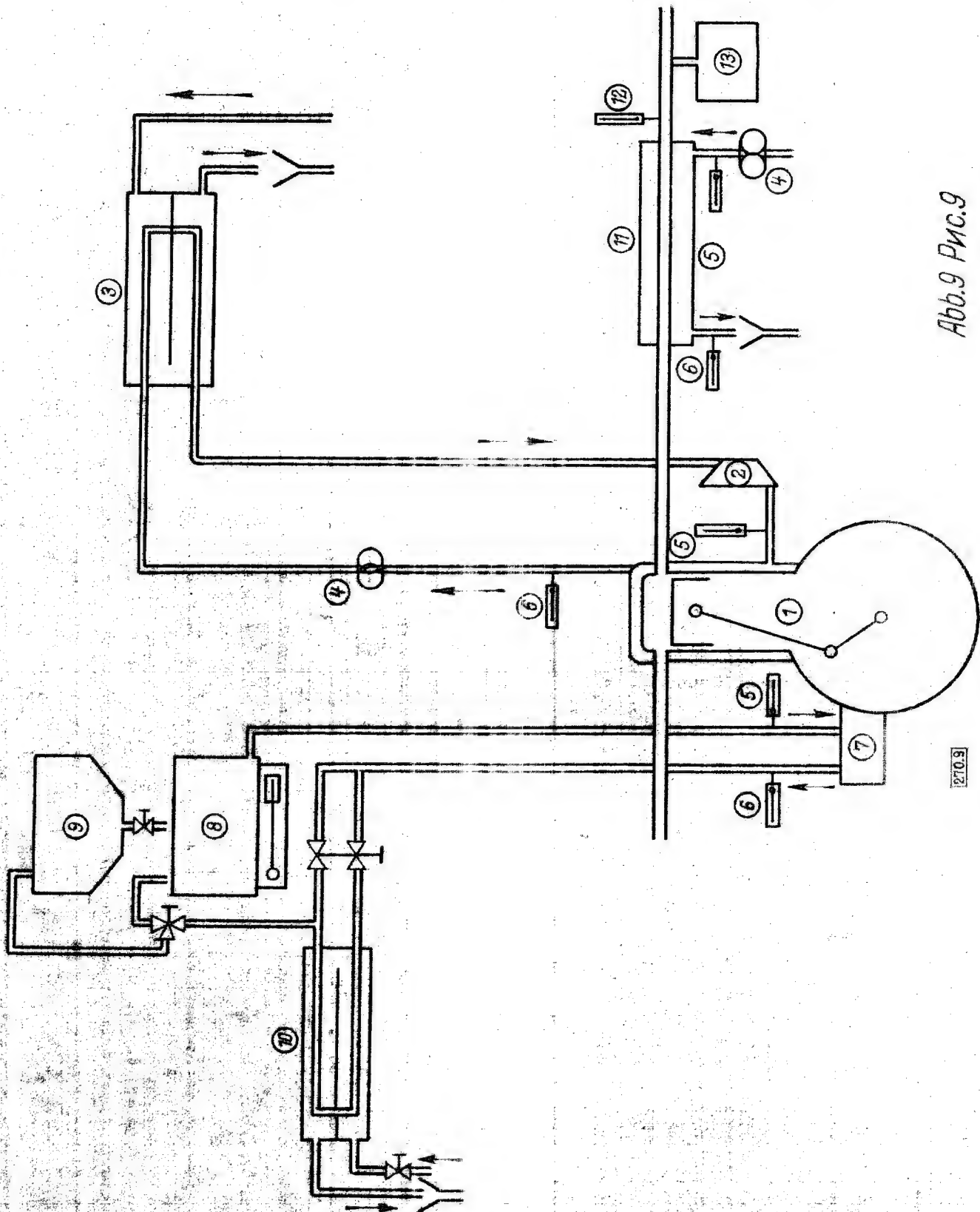


Abb. 9 Рис. 9

270.9



Abb.1 Рис.1

[272.1]

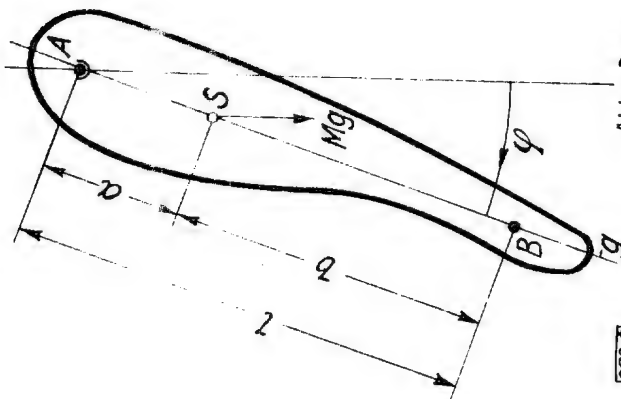


Abb.2 Рис.2

[272.2]

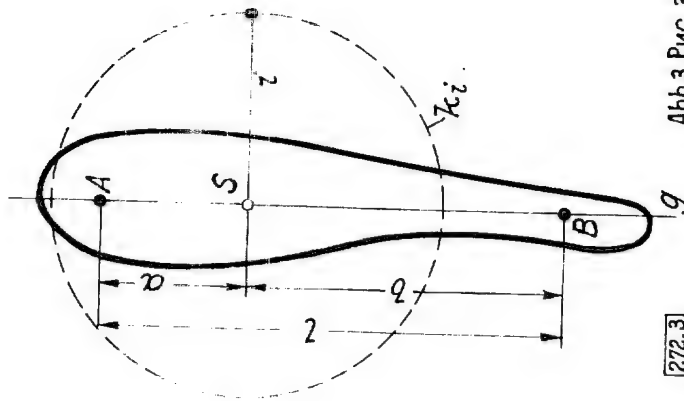


Abb.3 Рис.3

[272.3]

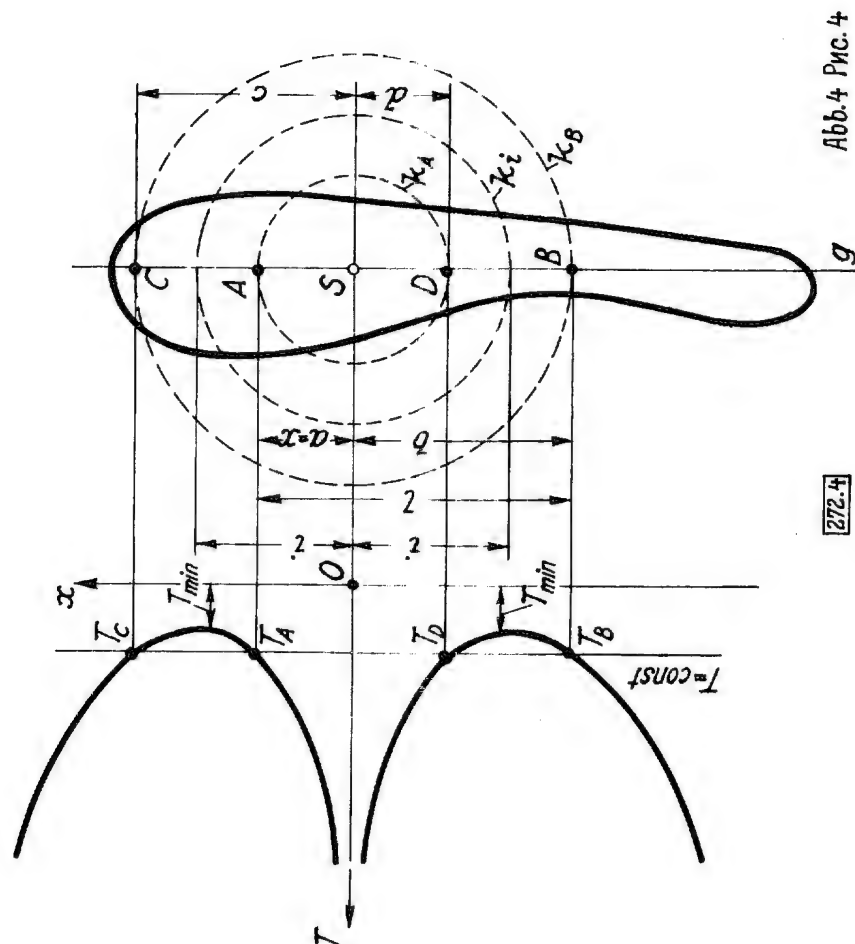


Abb. 4 Рис. 4

[272.4]

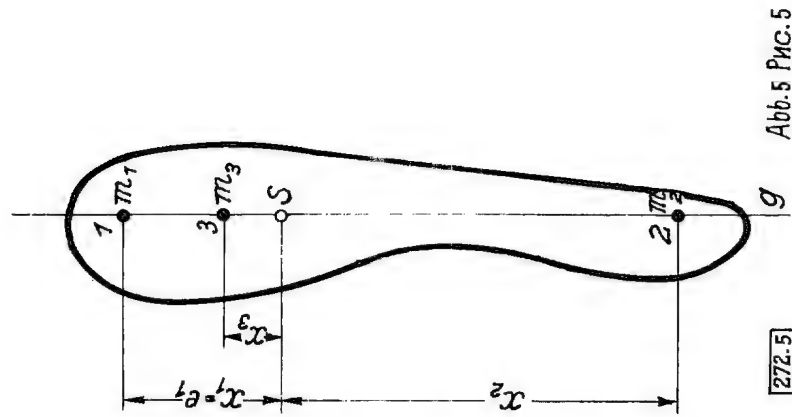
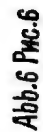


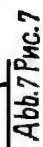
Abb. 5 Рис. 5

[272.5]





272.6



272.7



**8.2.2**

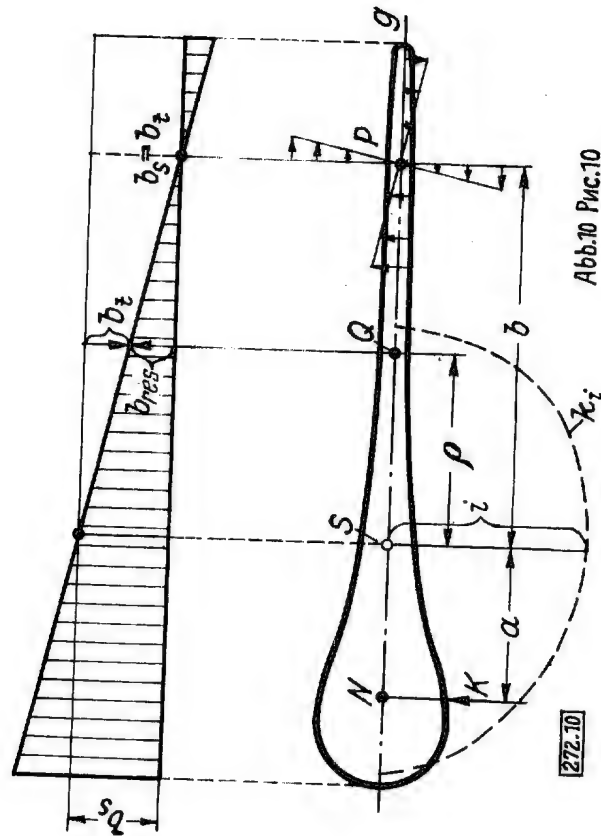


Abb. 10 Рис. 10

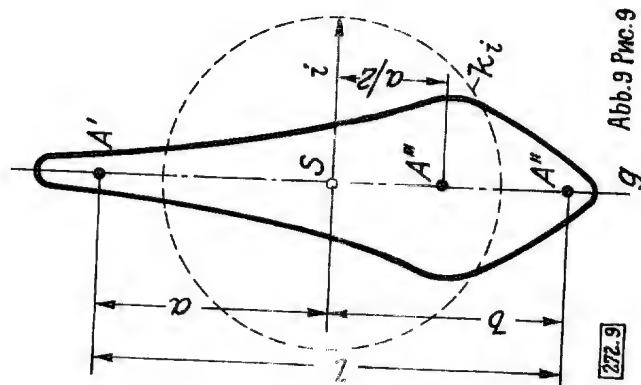
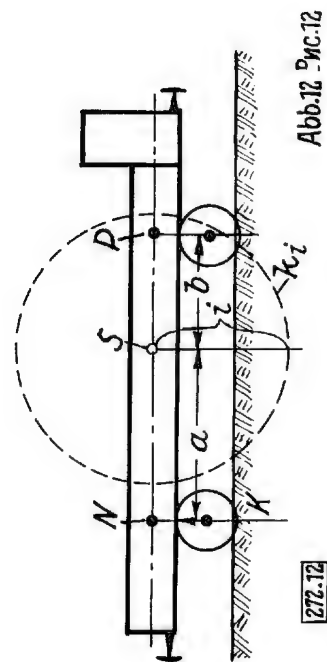
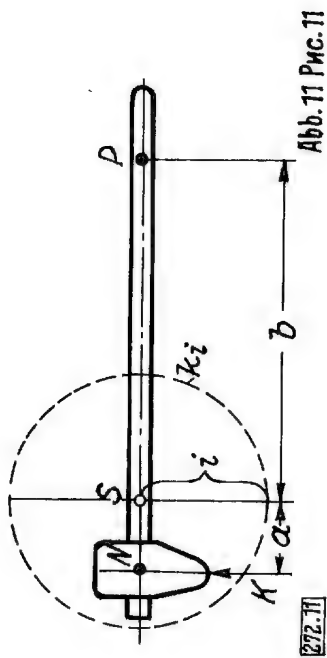
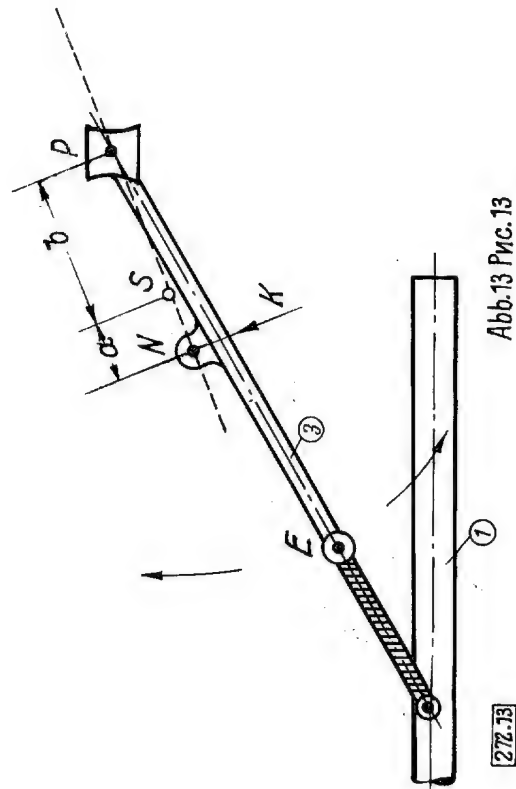
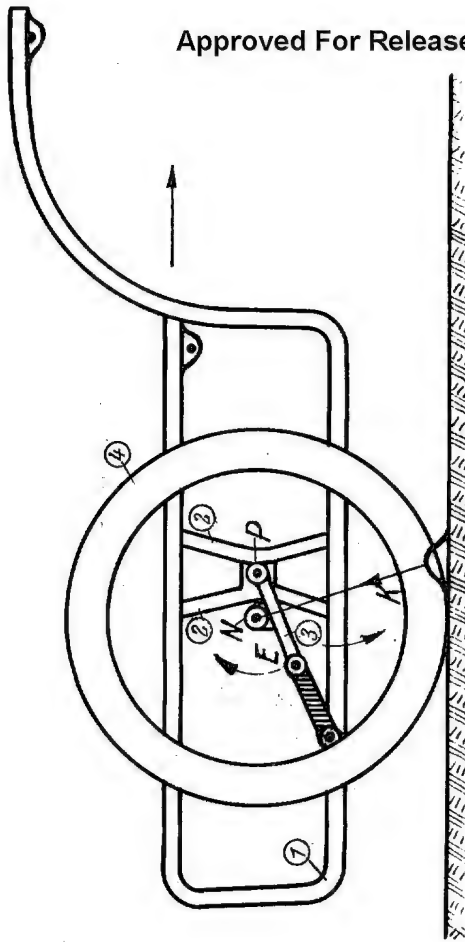


Abb. 9 Рис. 9



272.15

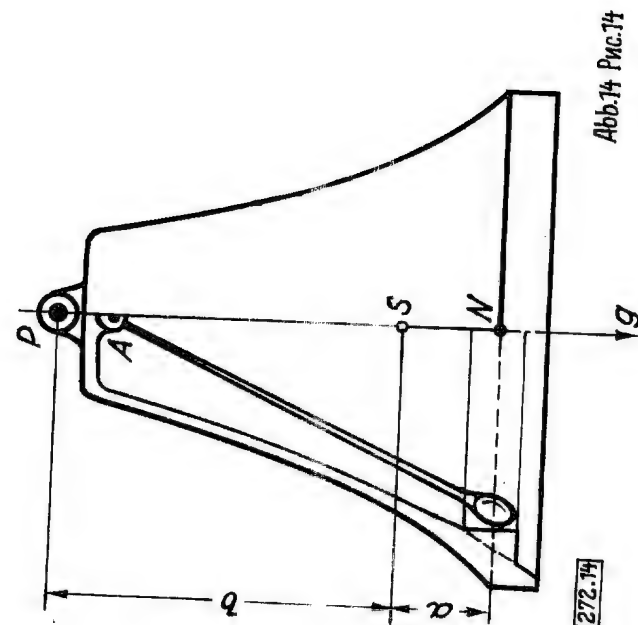


Abb.14 Рис.14

272.14

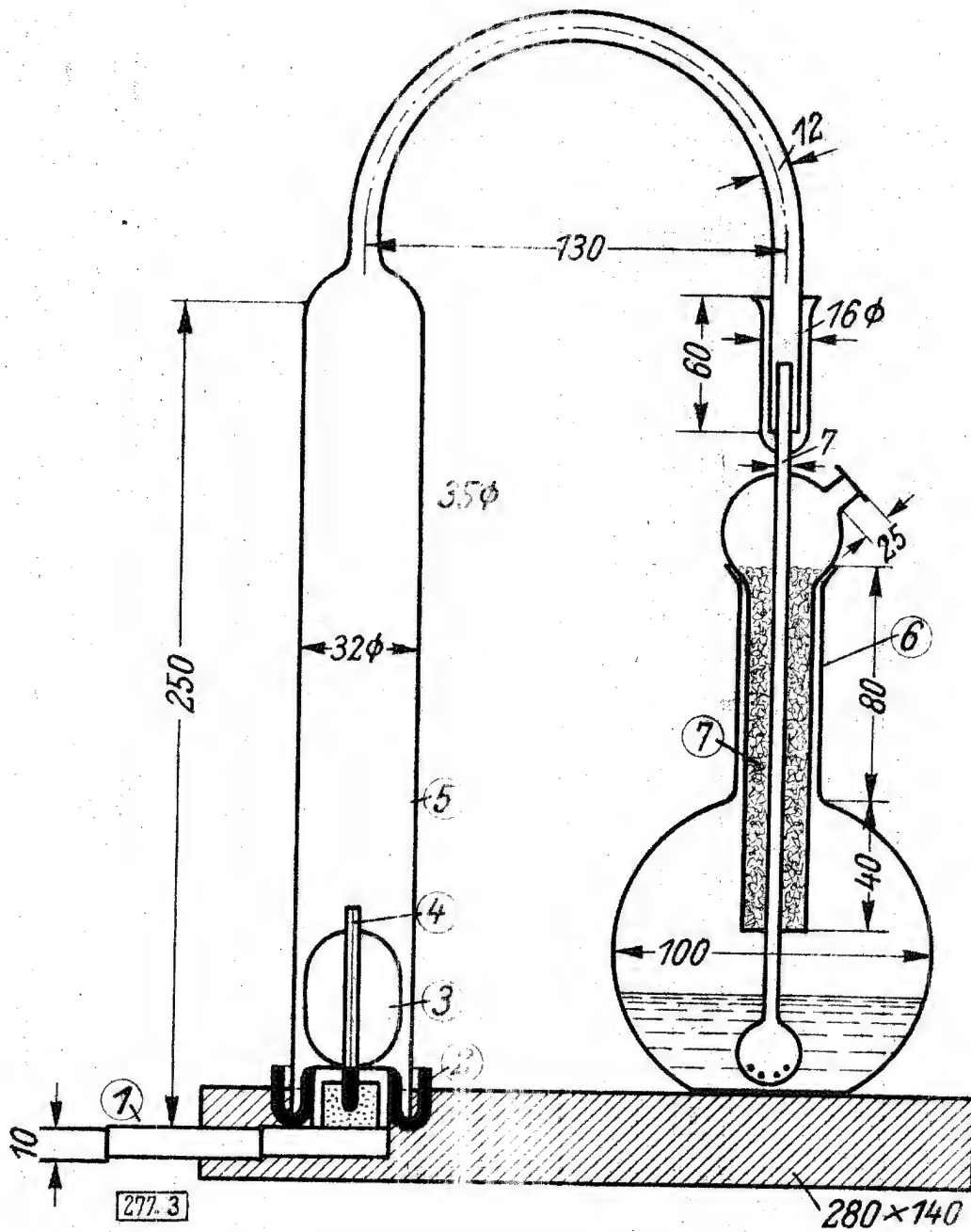


Abb. 3 Рис. 3



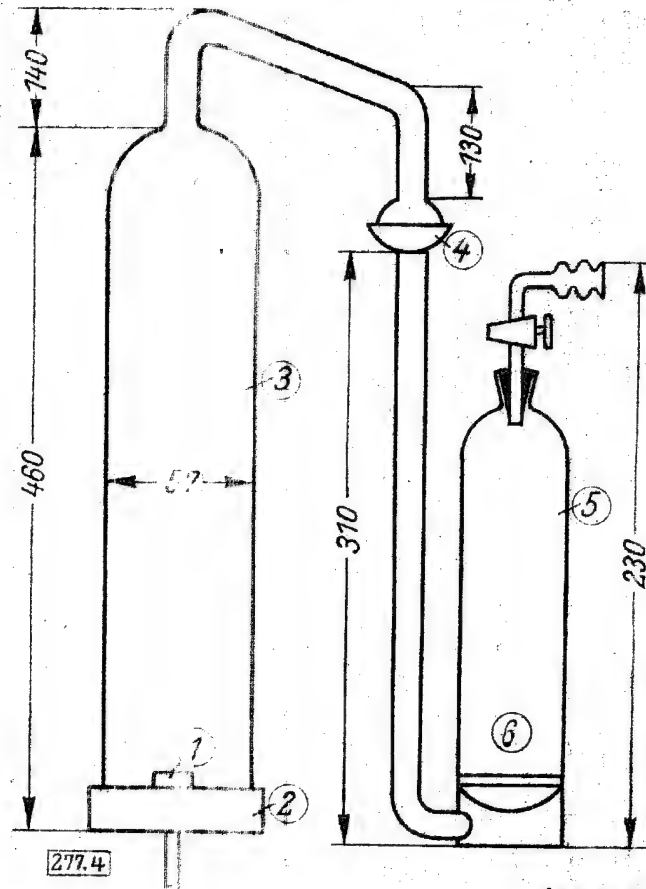


Abb. 4 Рис. 4

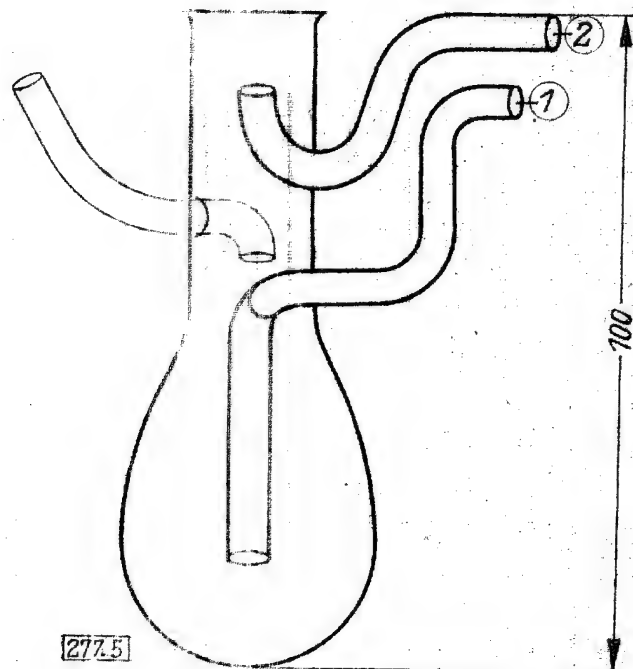


Abb. 5 Рис. 5

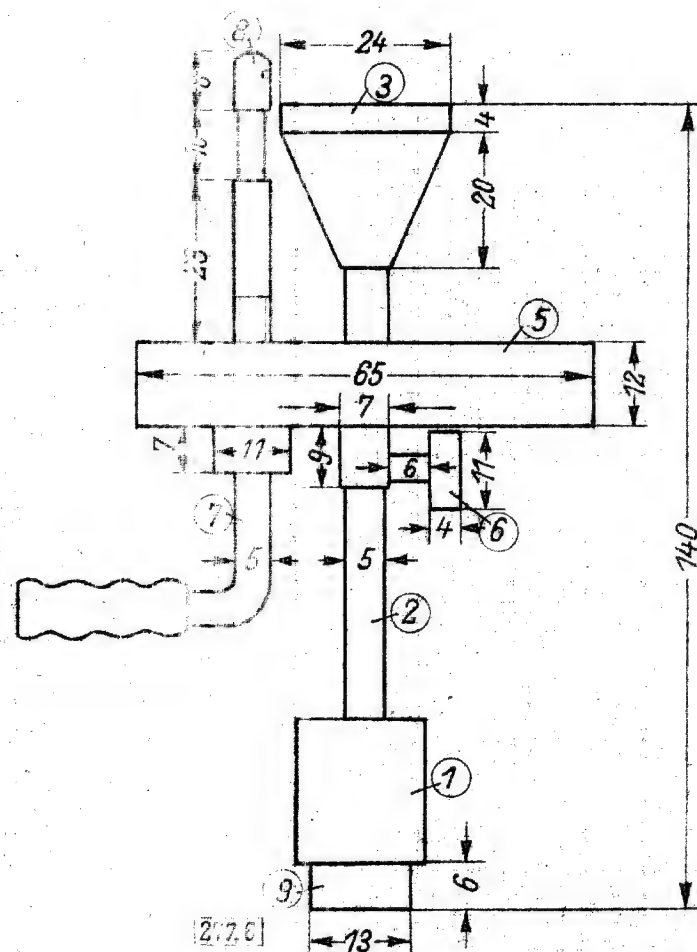
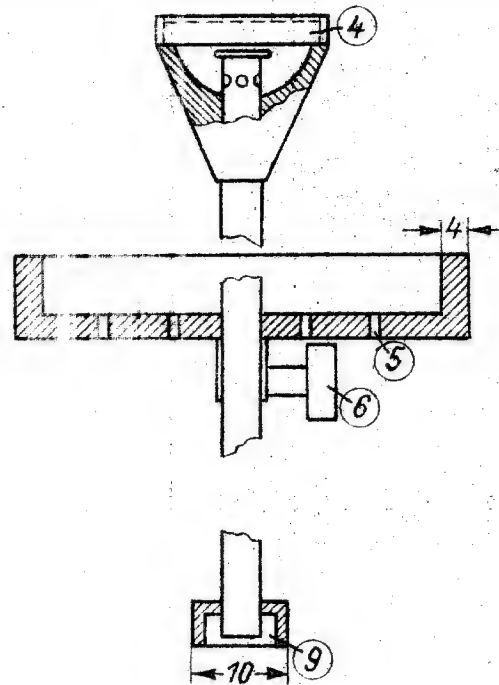


Abb. 6 Рис. 6

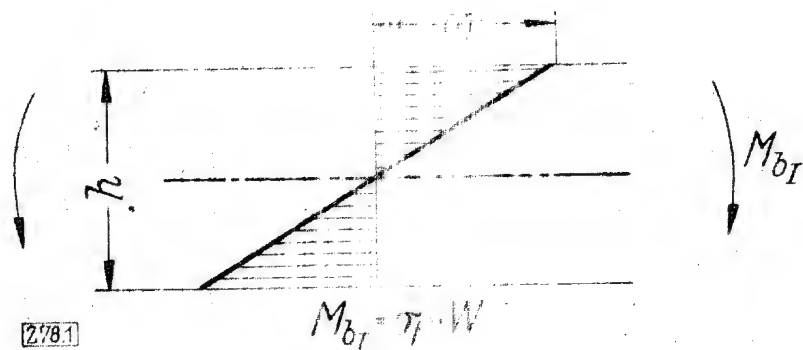


Abb. 1  
PVC.1

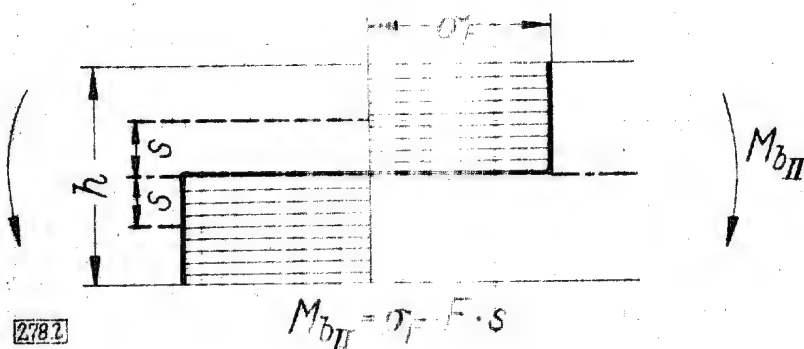


Abb. 2  
PVC.2

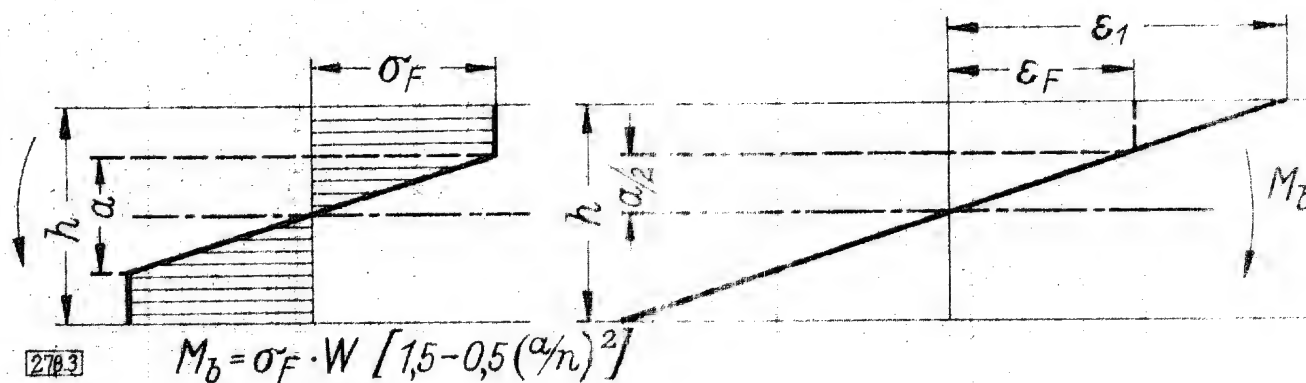


Abb. 3  
PVC.3



Рис. 4



Дбб. 5  
РИС. 5

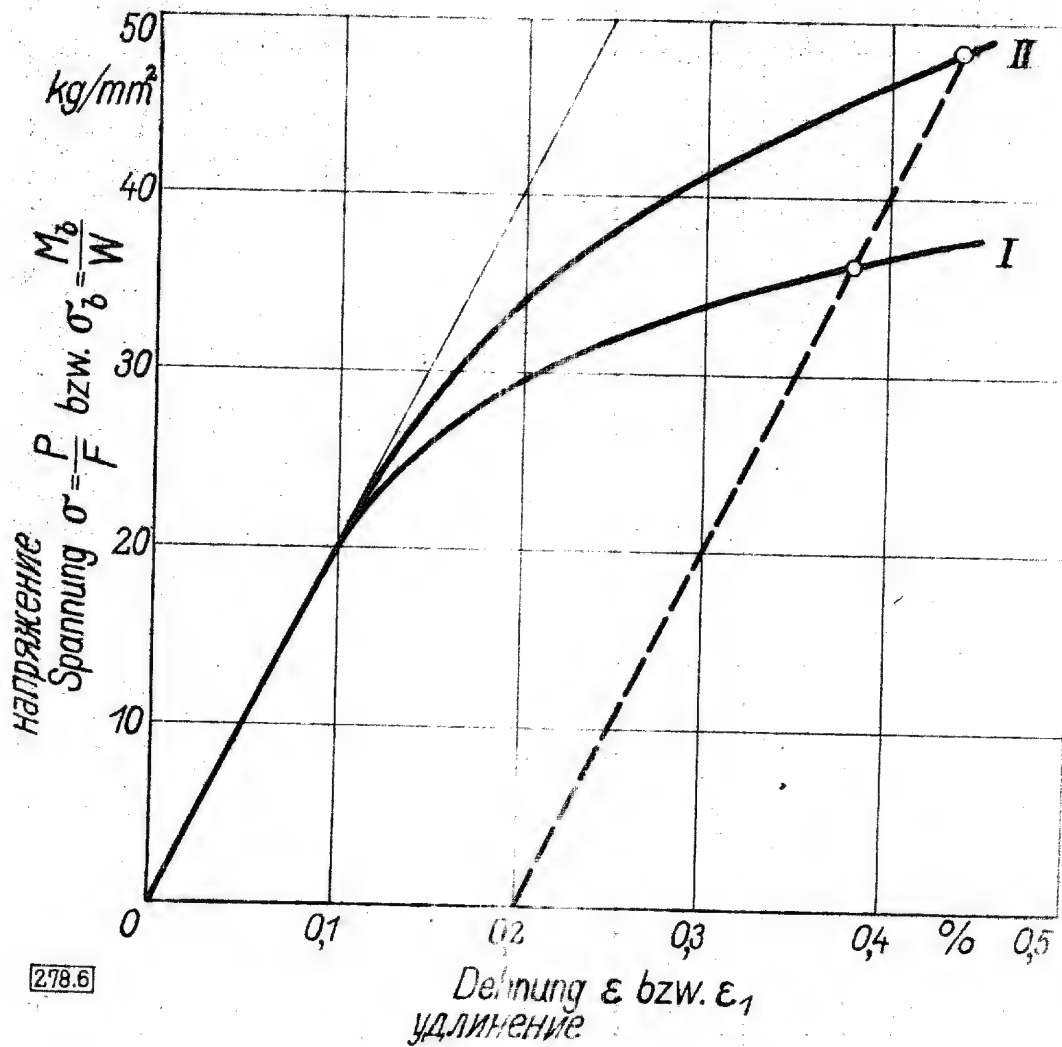


Abb. 6  
Рис. 6

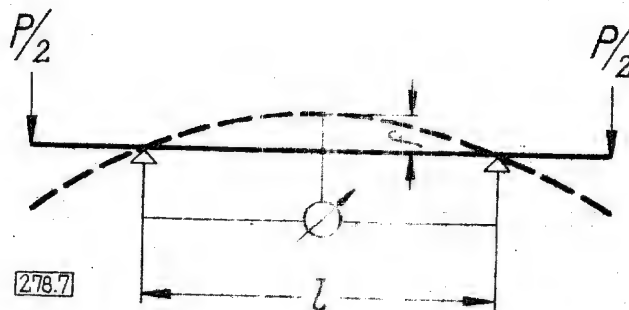
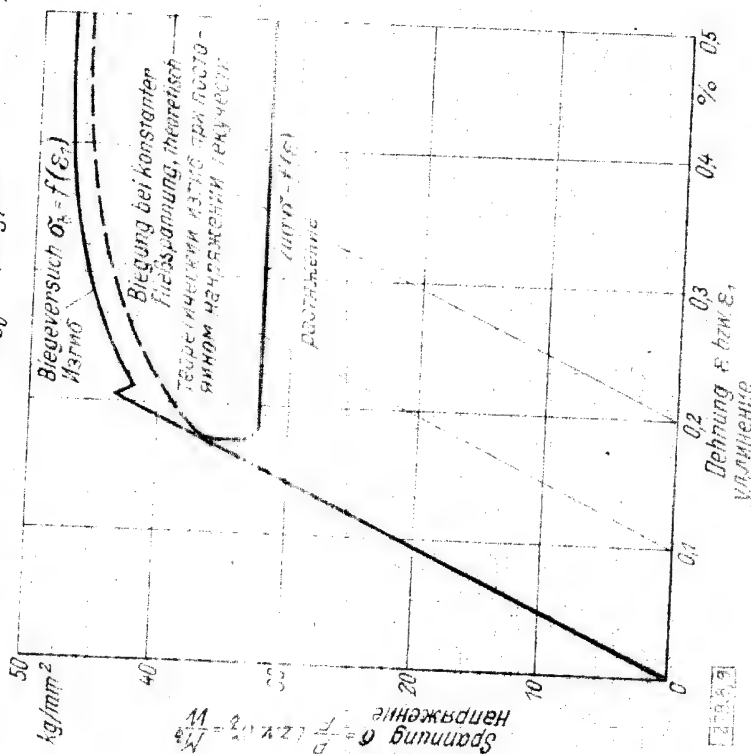


Abb. 7  
Рис. 7

Werkstoff mit ausgesprochenen oberer und unterer Fließgrenze  
Stahl 52, normal gegläht

Материал с ясно выраженными верхним и нижним  
пределом текучести, сталь 52, нормально отожжена

$\sigma_{s0} = 36,3 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{su} = 31,9 \text{ kg/mm}^2$



Werkstoff mit stetig verlaufender Spannungs-Dehnungs-Kurve:  
FlieBwerkstoff 3115.5 Al-Cu-Mg, ausgehärtet  
Материал с непрерывно возрастающей кривой-напряжения  
удлинения: авиаматериал 3115.5 Al-Cu-Mg, закален

$\sigma_{0.2} = 30,7 \text{ kg/mm}^2$

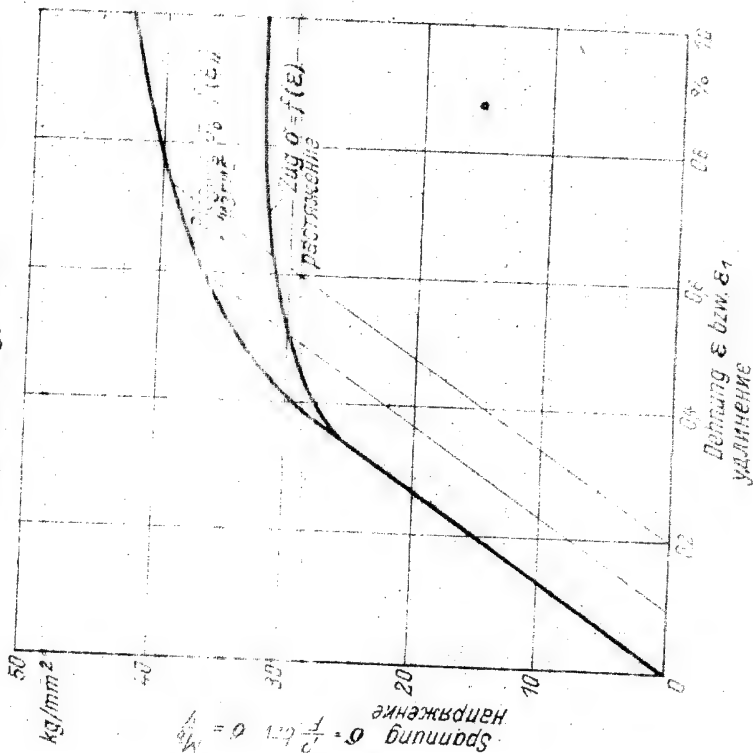


Abb. 8.9 Pro. 8.9



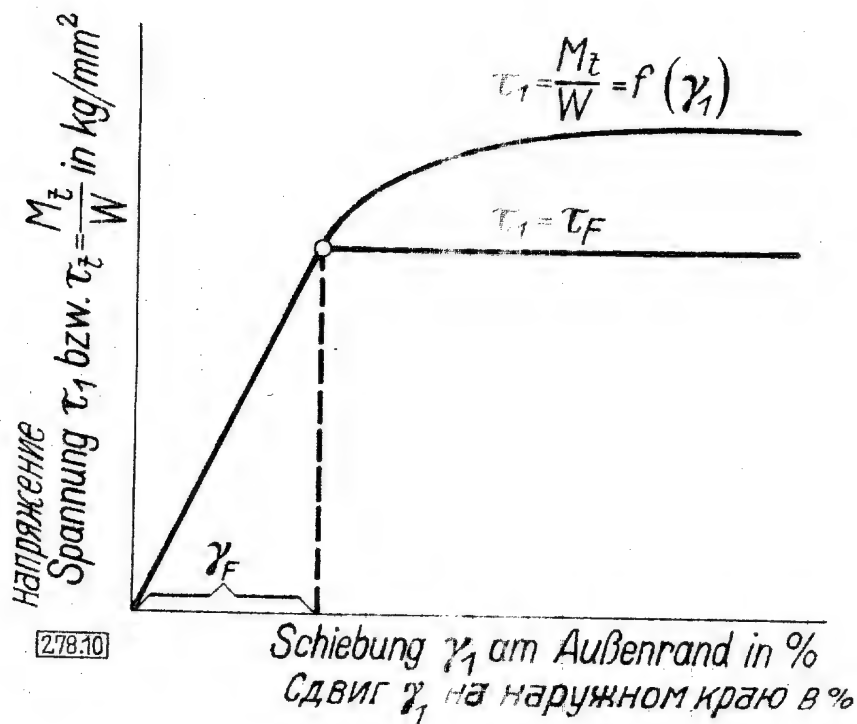
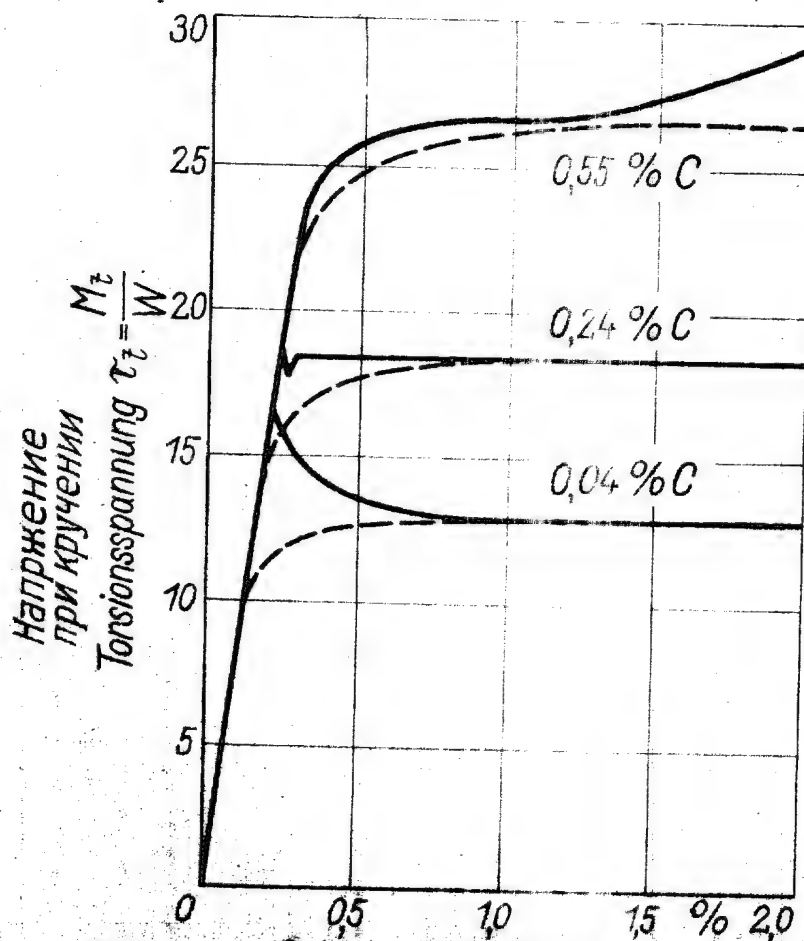


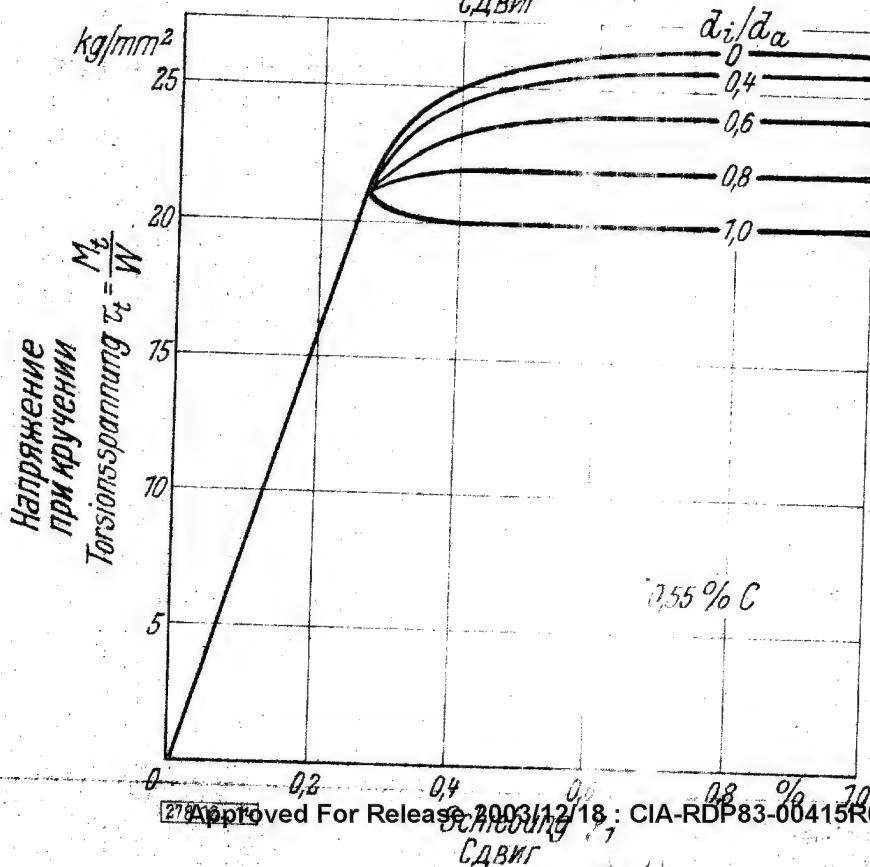
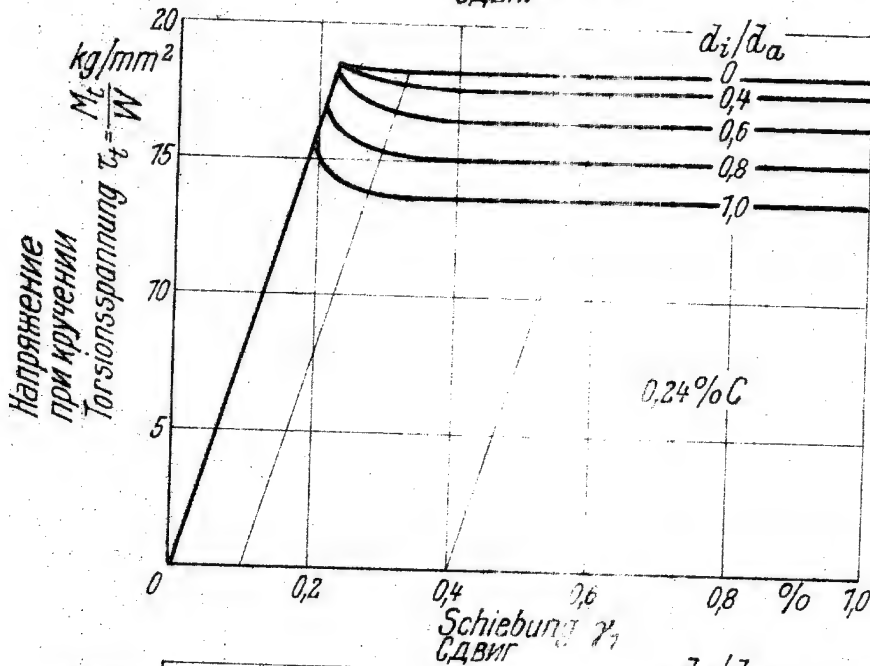
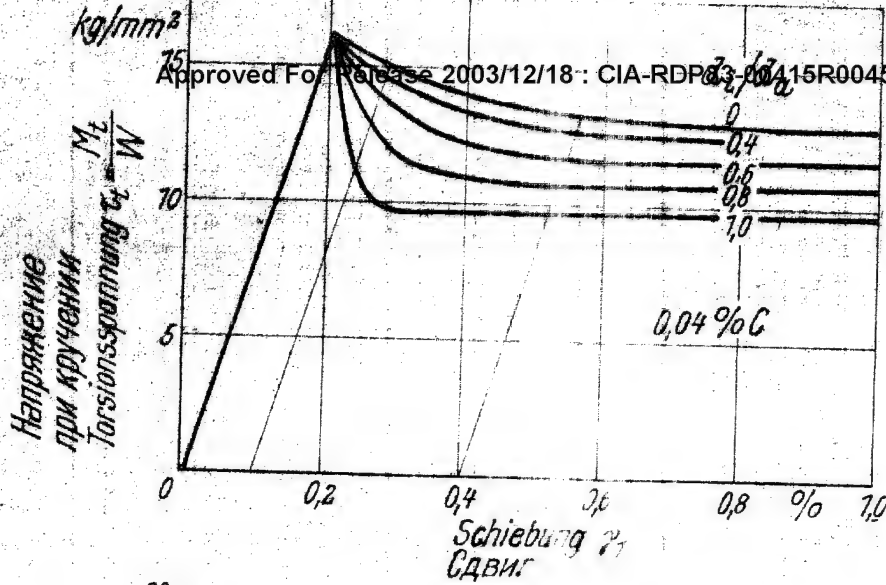
Abb. 10  
PISC.10



278.11

Сдвиг  $\gamma_1$  на наружном краю

Abb. 11  
PISC.11



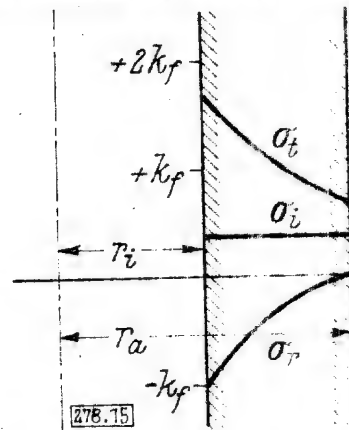


Abb. 15  
Рис. 15

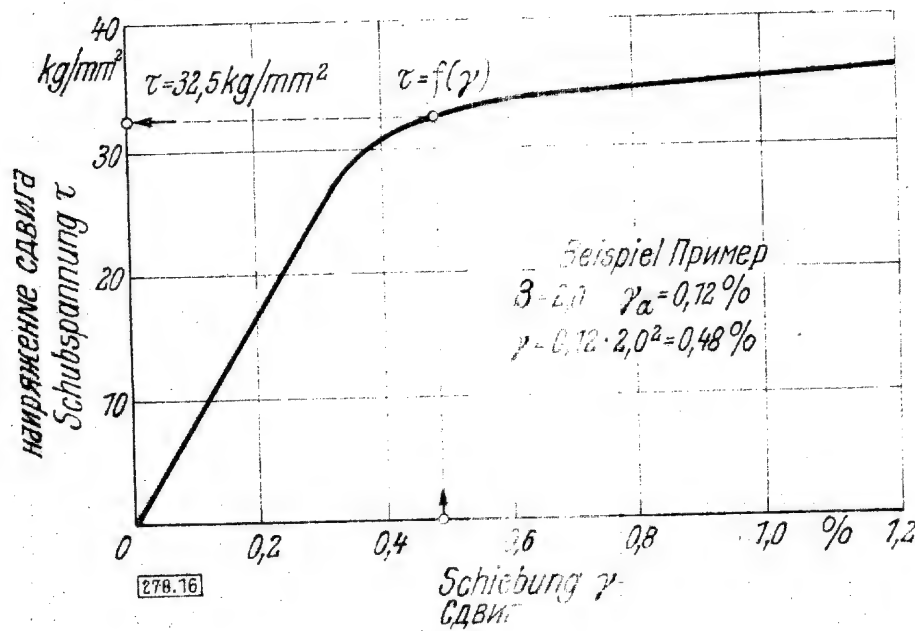


Abb. 16  
Рис. 16

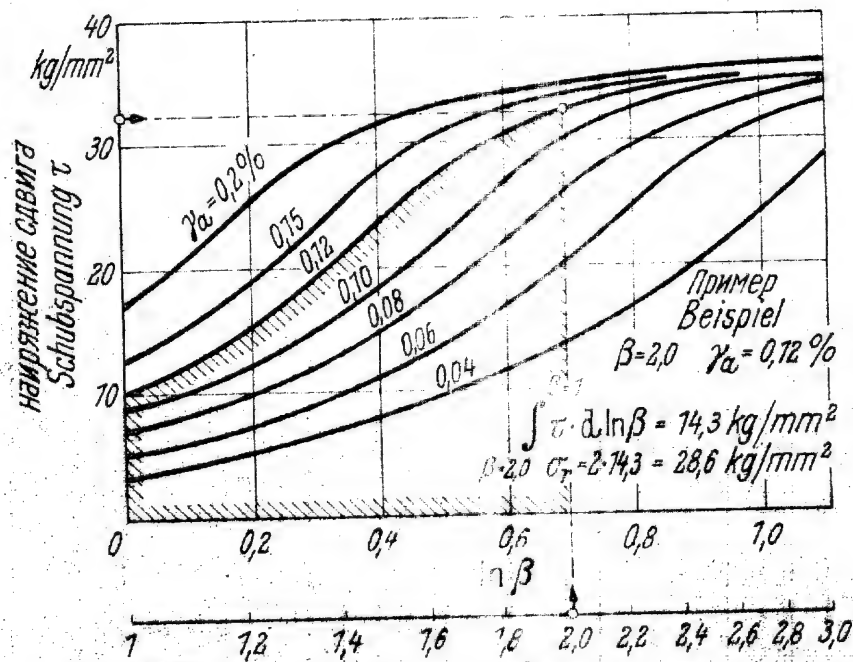


Abb. 17  
Рис. 17

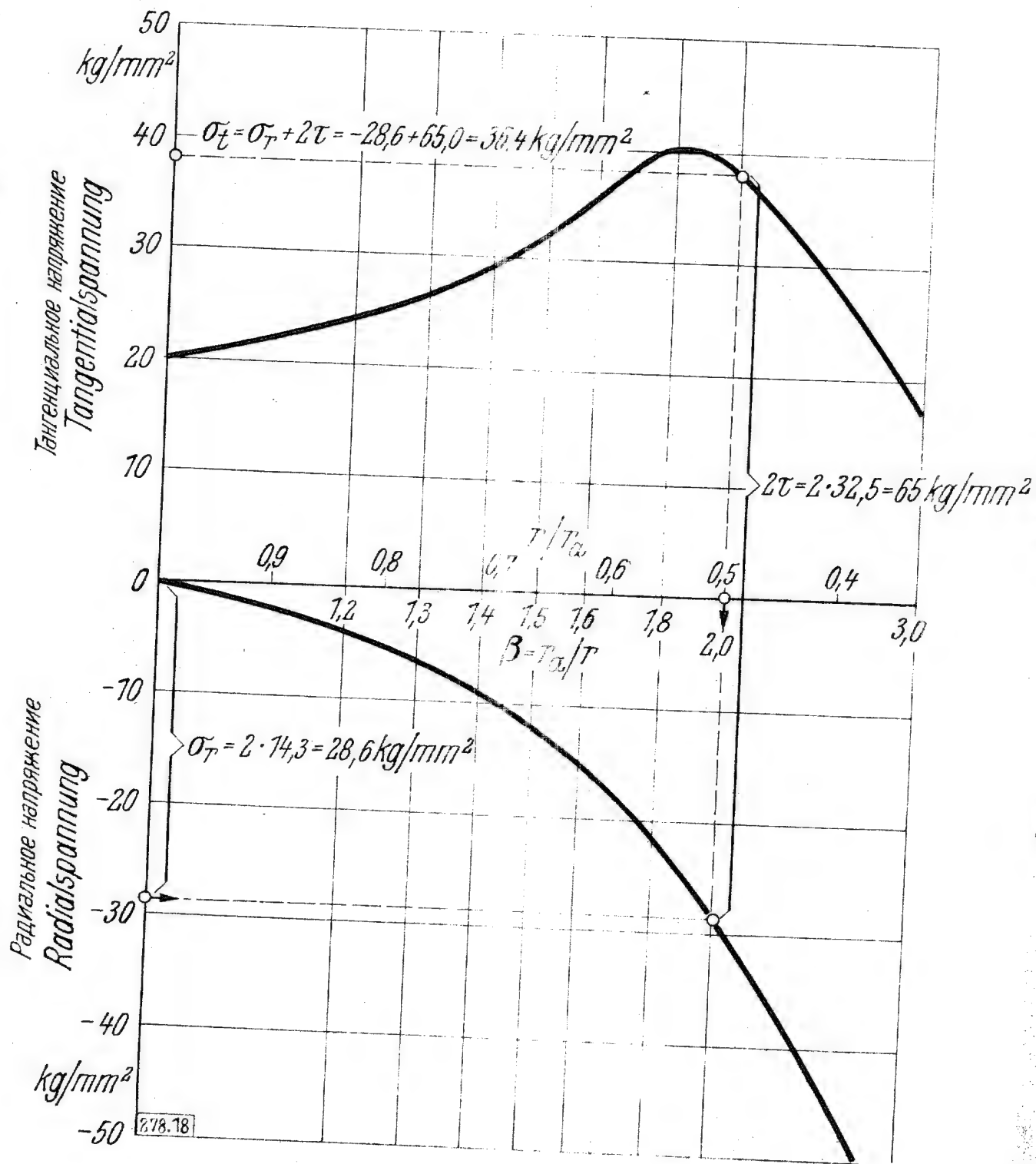


Abb. 18  
Рис. 18

2 Abb. 19

PVC 19

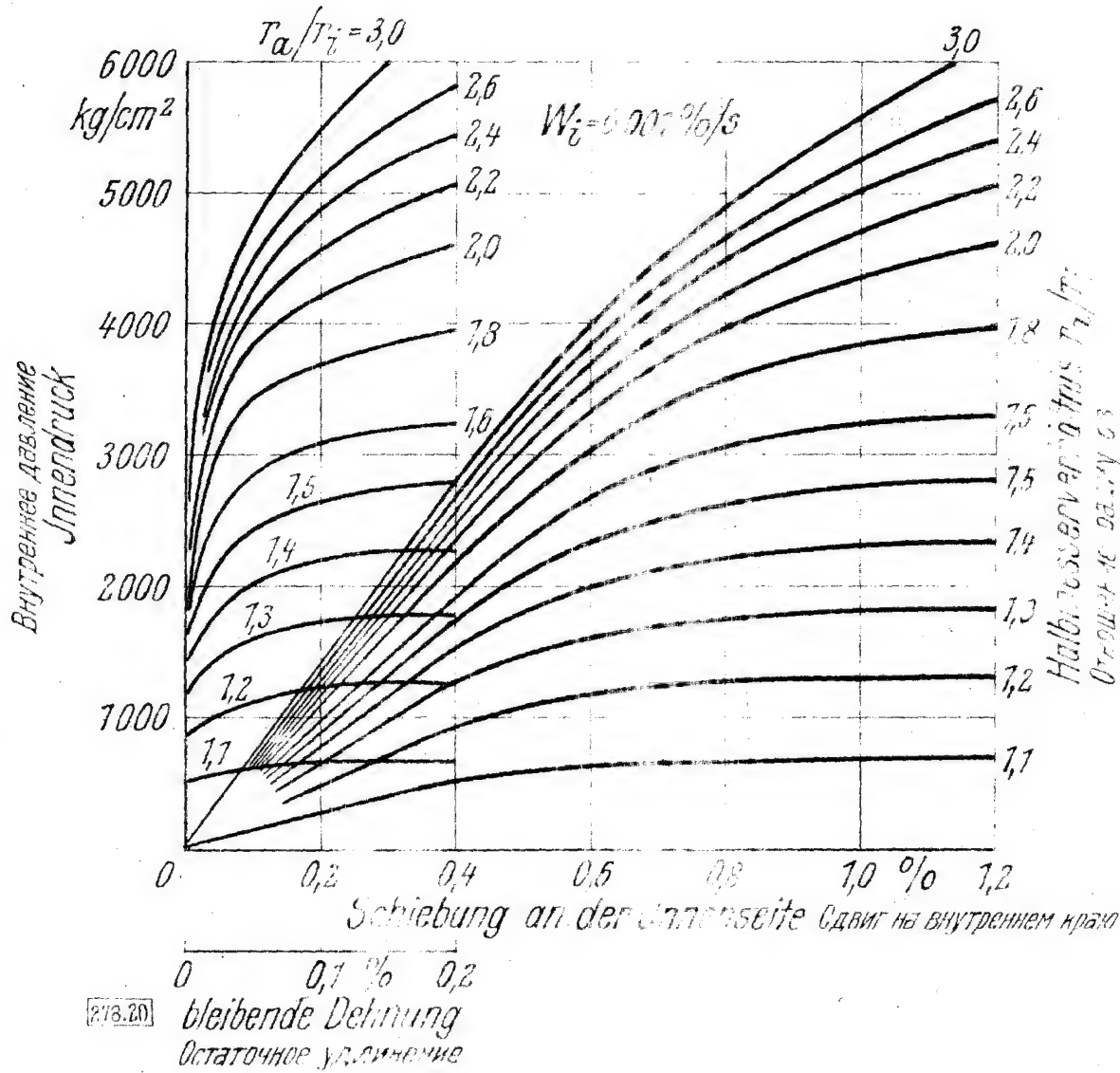


Abb. 20  
Рис. 20



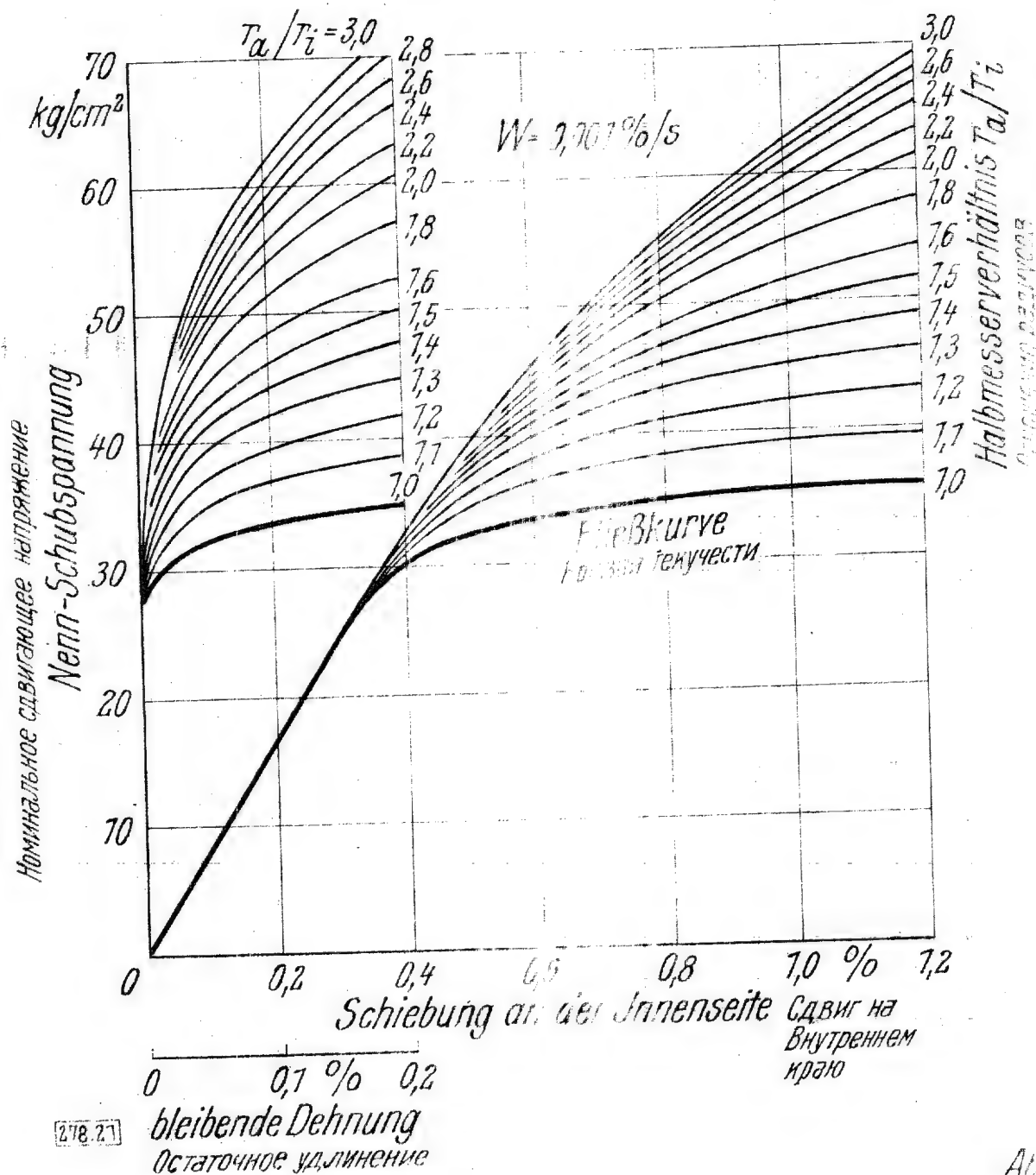


Abb. 21  
Рис. 21

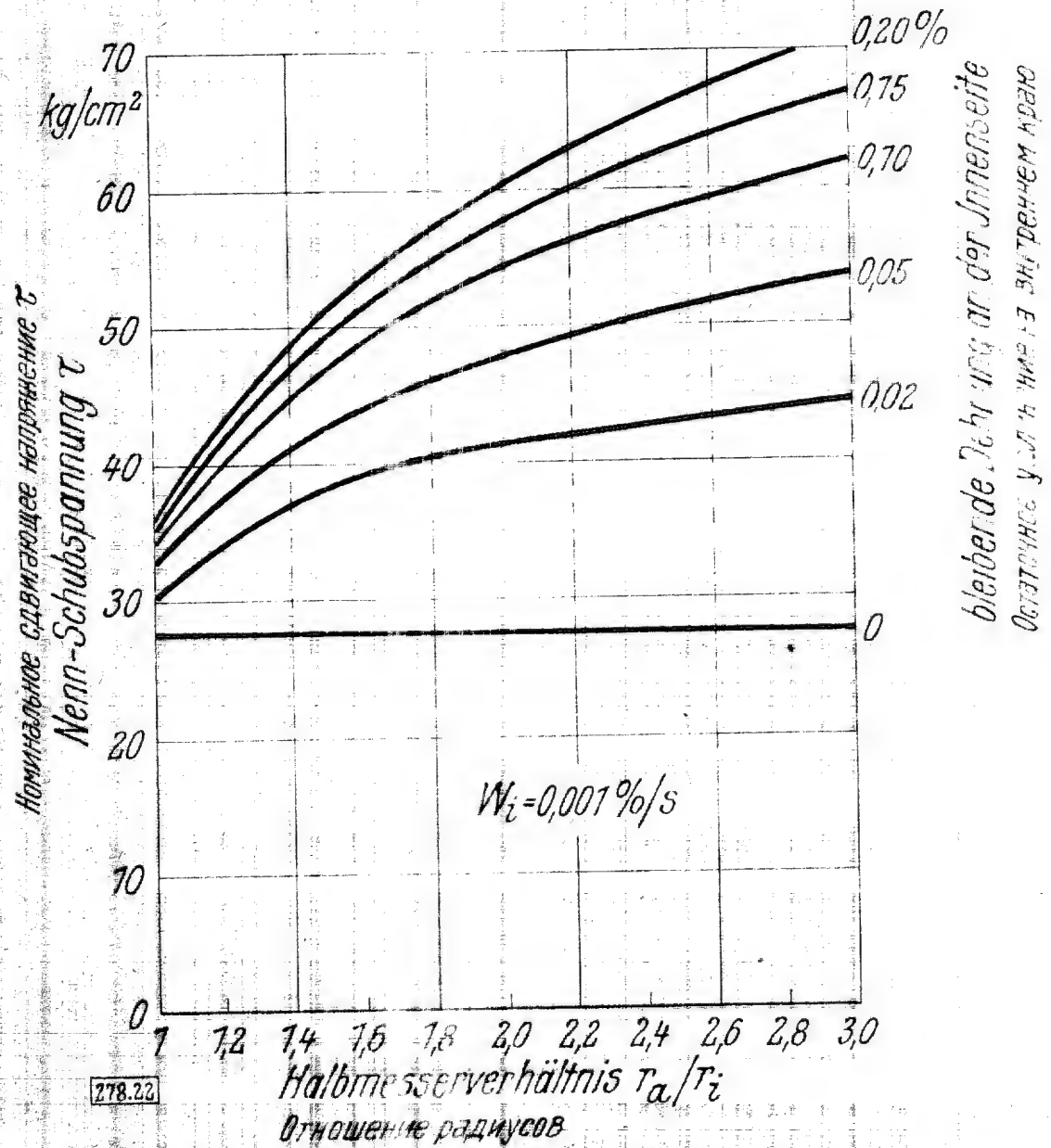
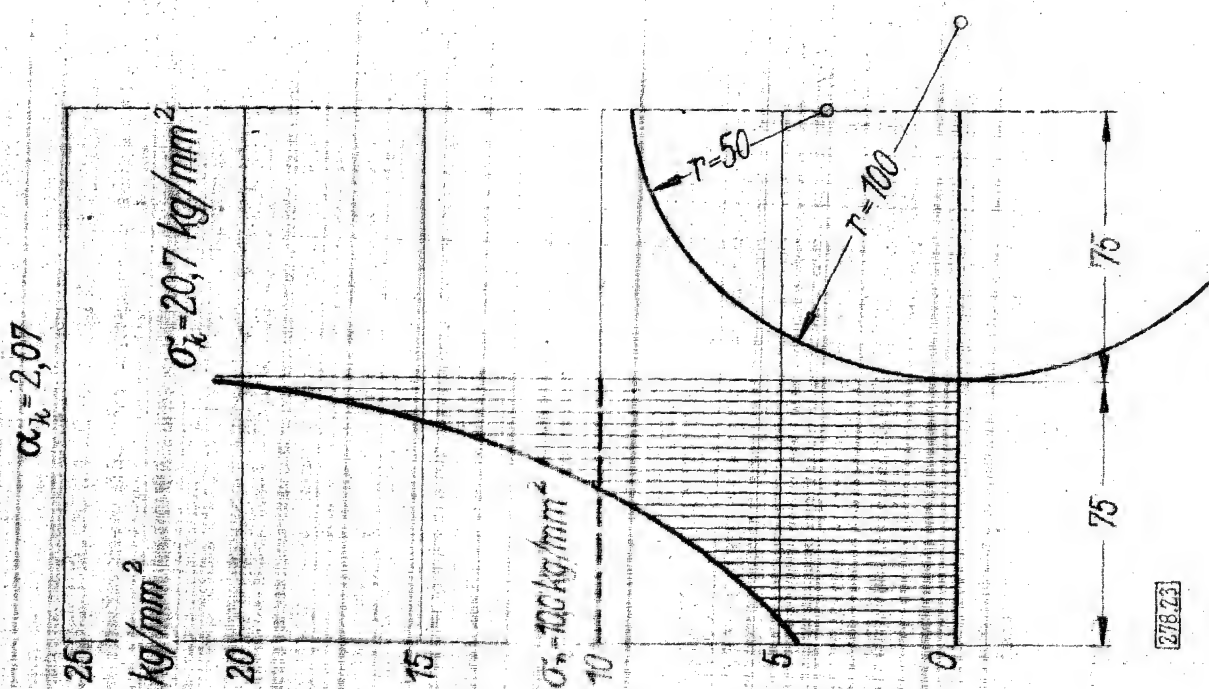
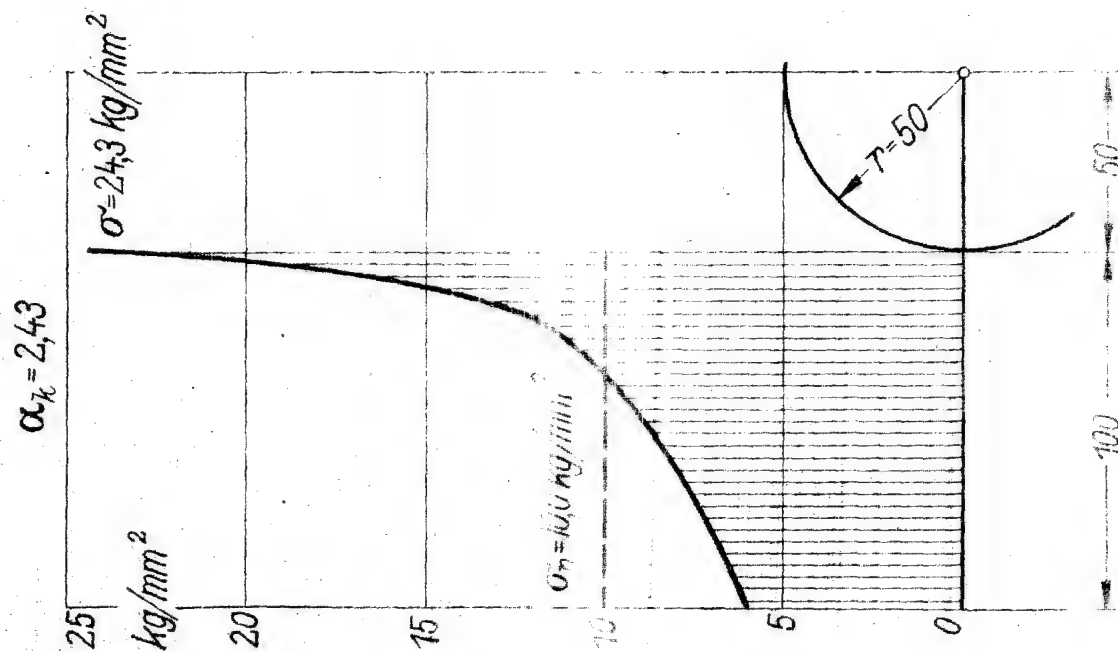


Abb. 22  
 Рис. 22

Abb. 23  
PWC.23



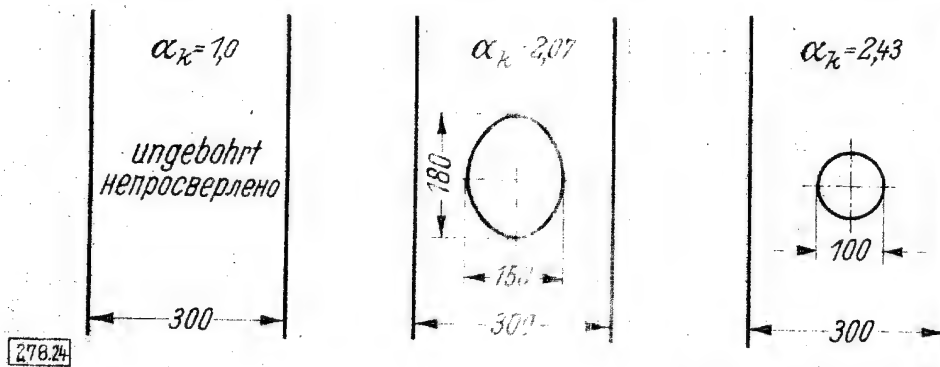
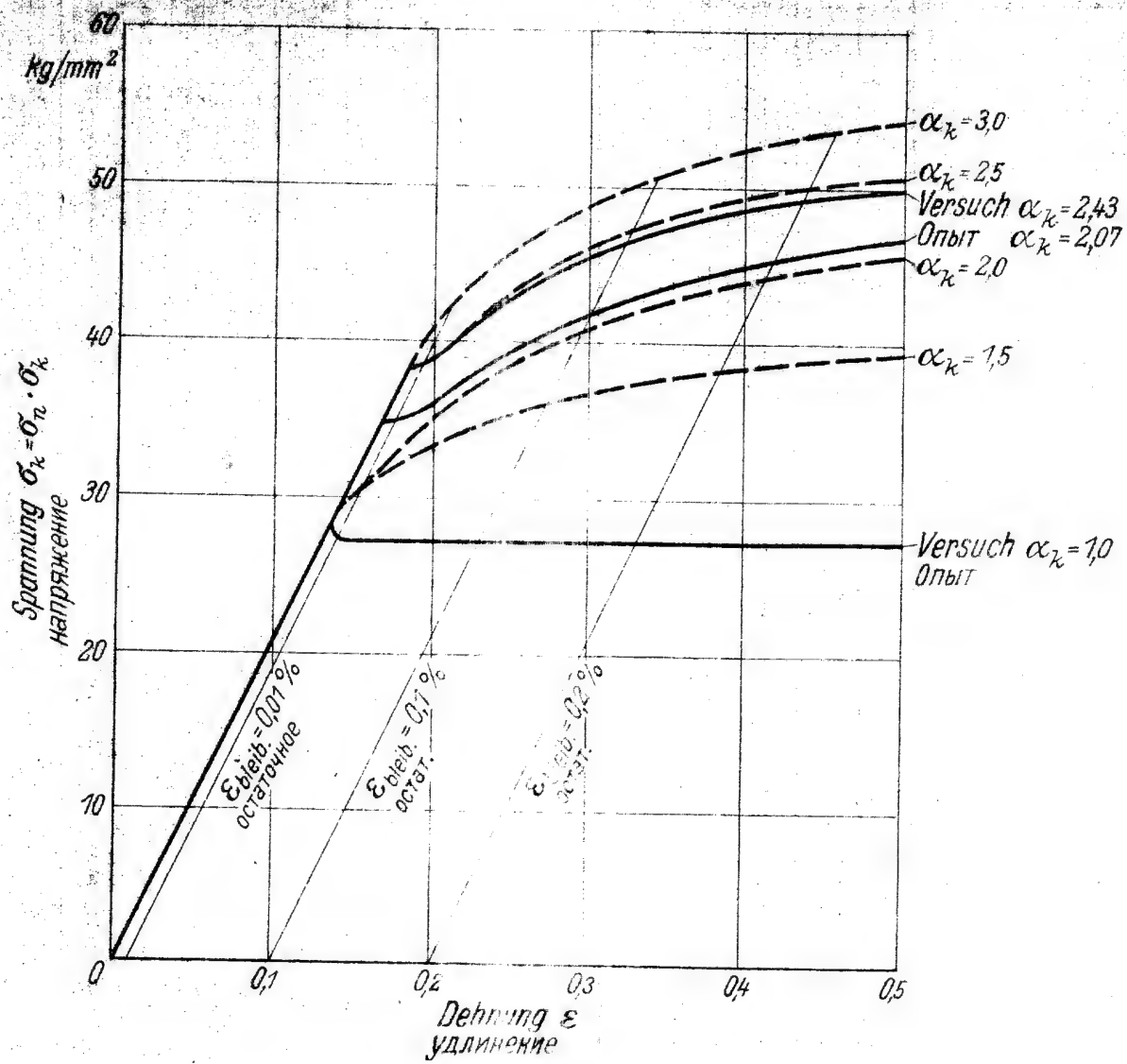


Abb. 24 Рис. 24

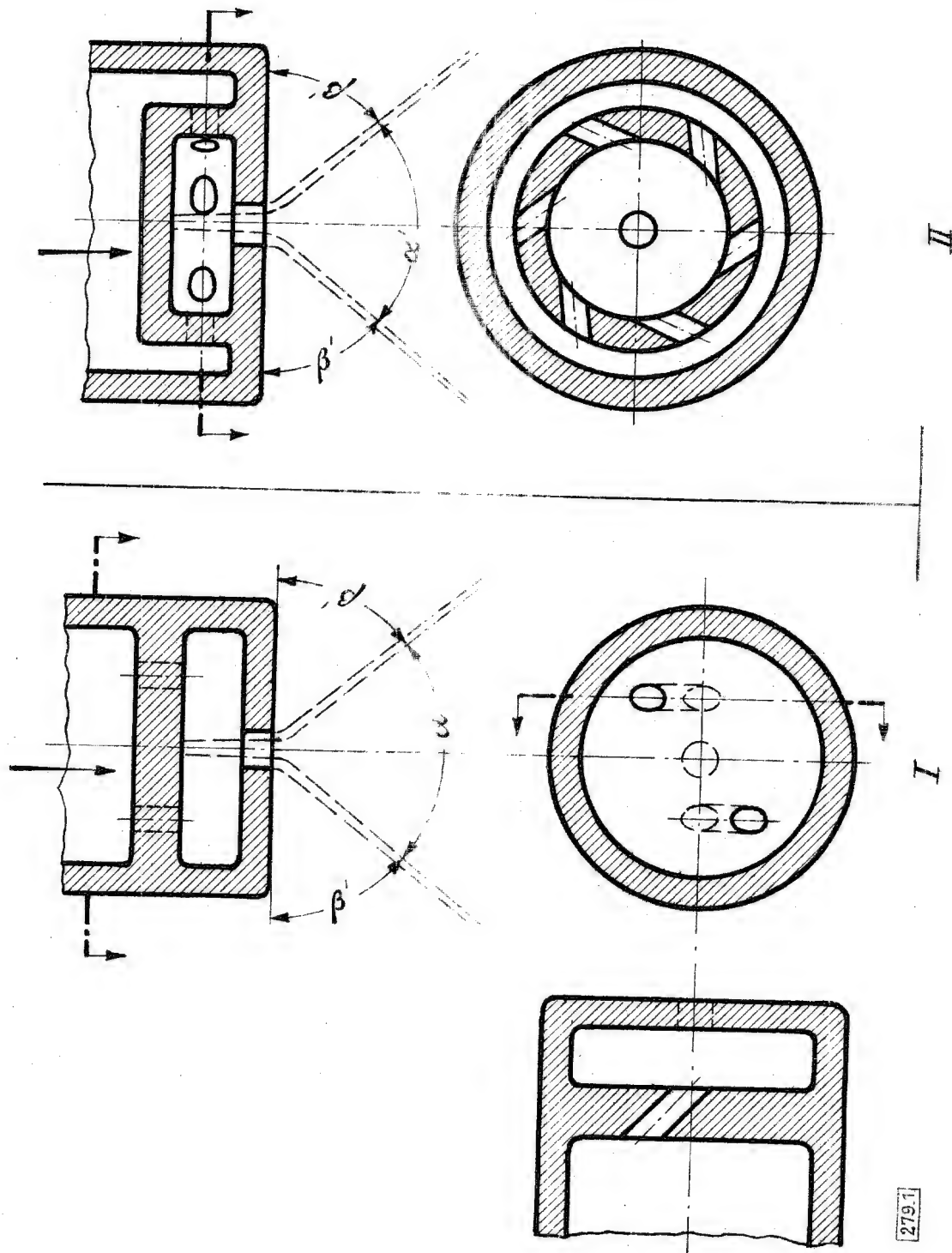
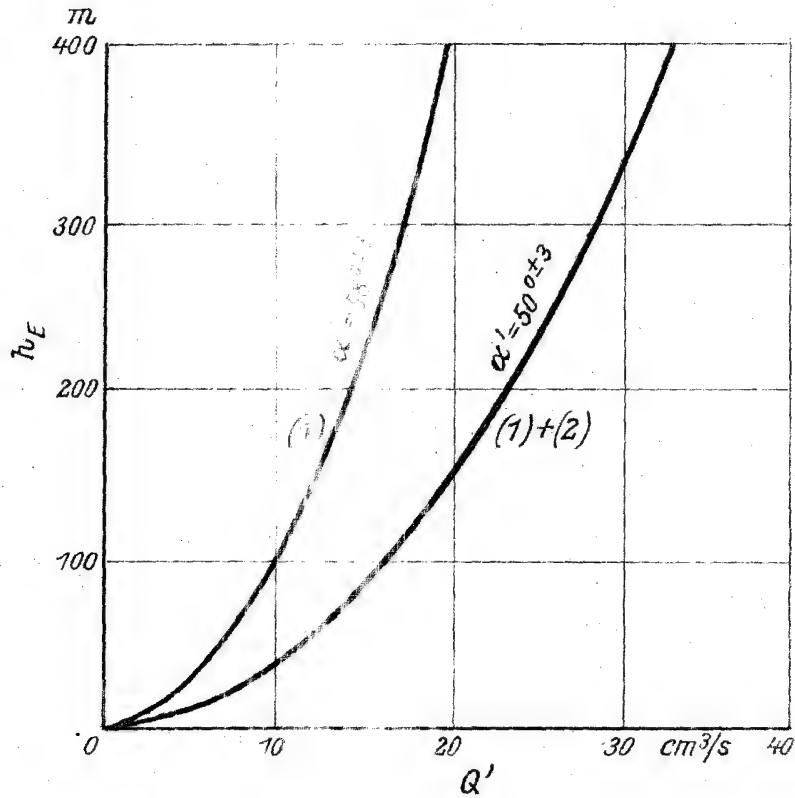
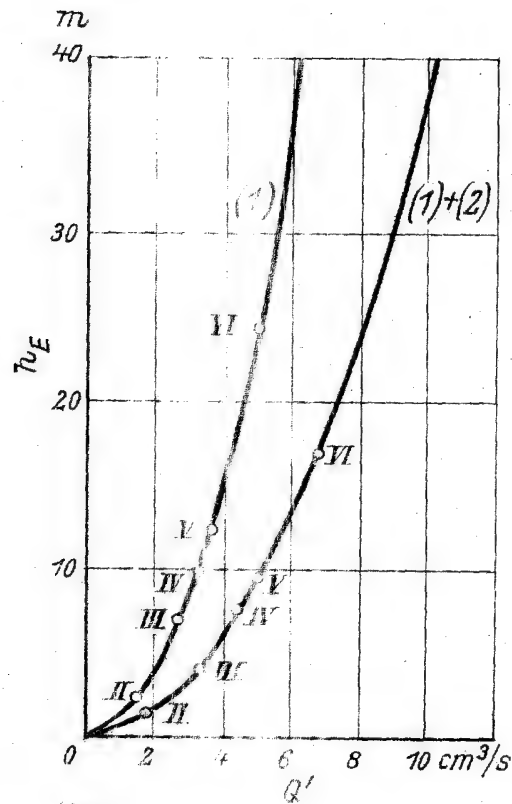


Abb. 1 Рис. 1



279.2

Abb.2 Рис.2.



279.3

Abb.3 Рис.3





*I*



*II*



*III*



*IV*



*V*



*VI*

2794

*Abb. 4 P<sub>100</sub> 4*

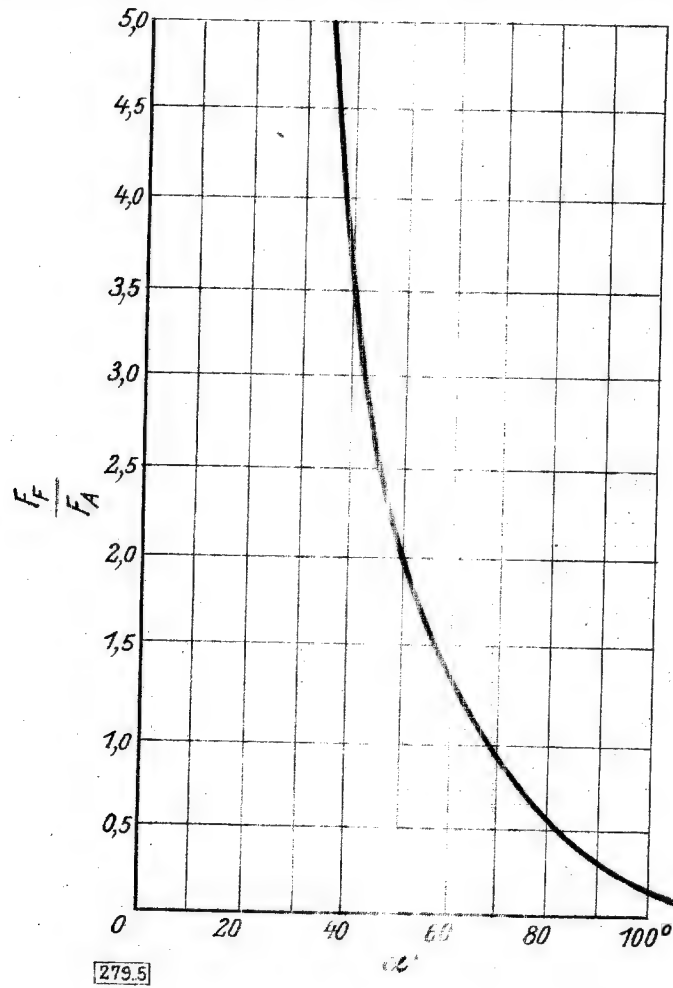


Abb.5 Рис.5

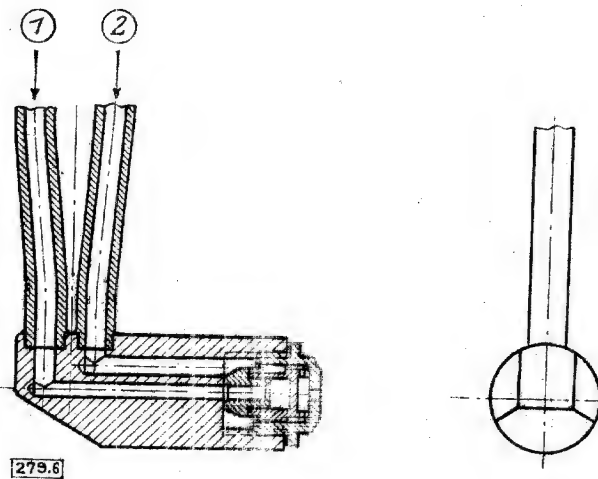
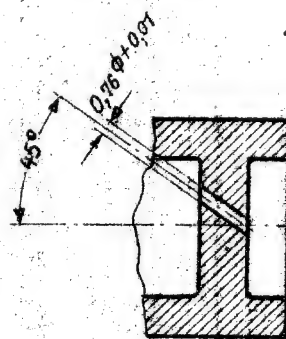
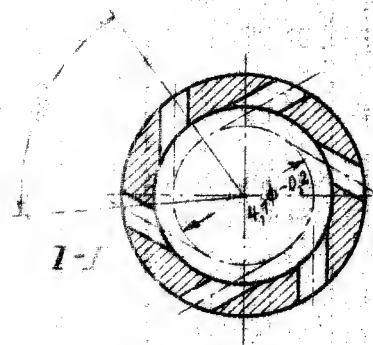
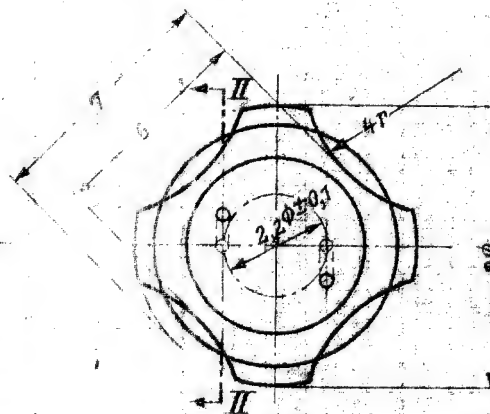


Abb.6 Рис.6



279.7



Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

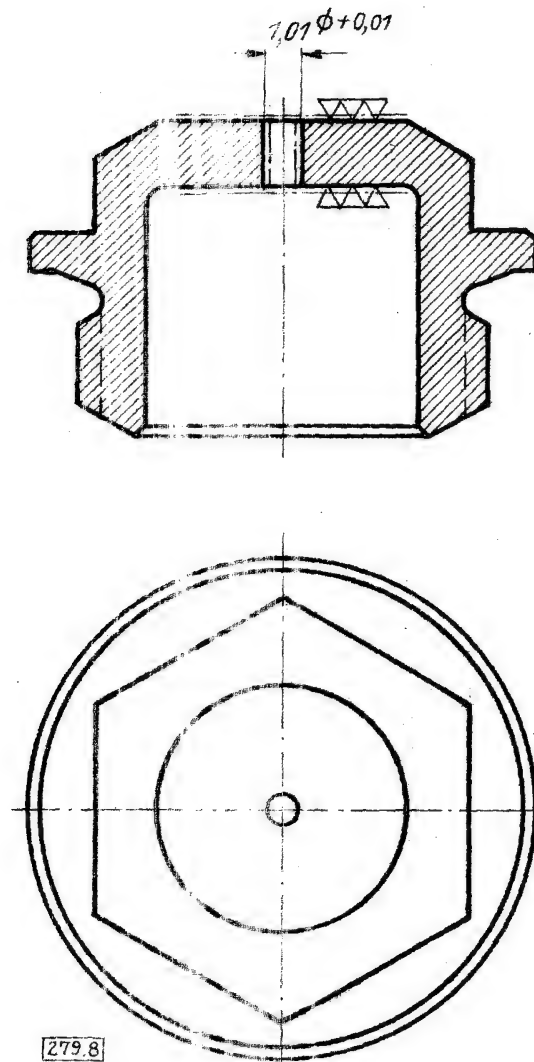


Abb. 8 Рис. 8

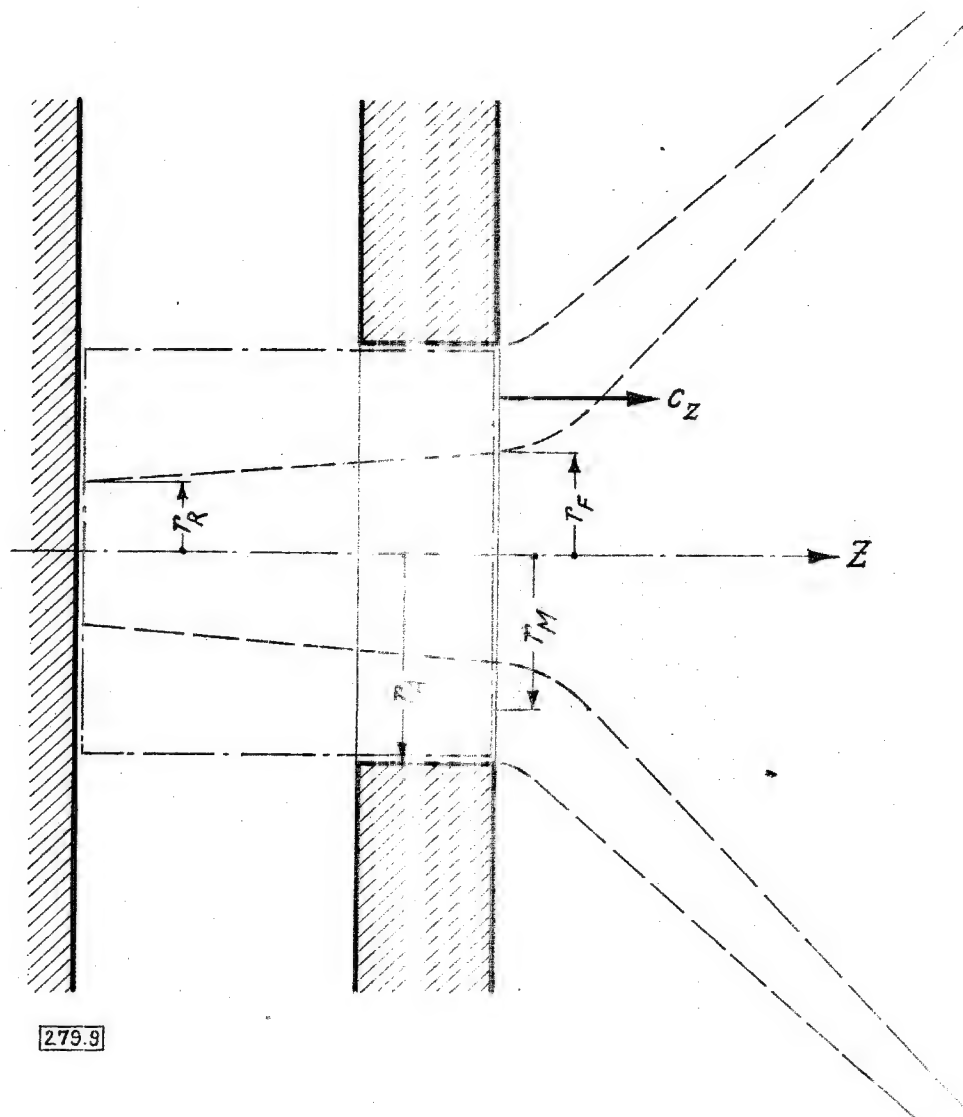


Abb.9 Рис. 9

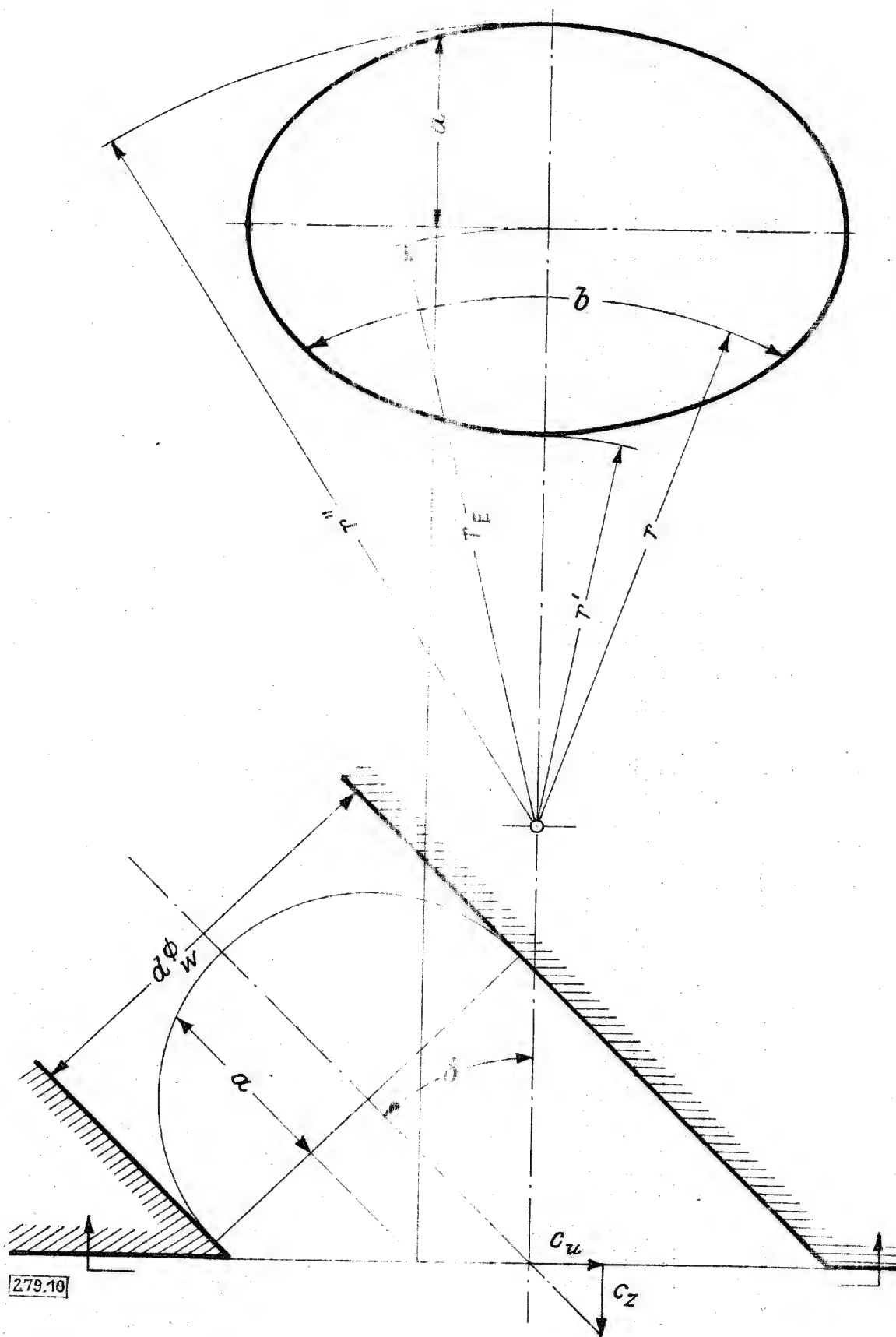


Abb. 10 Рис. 10



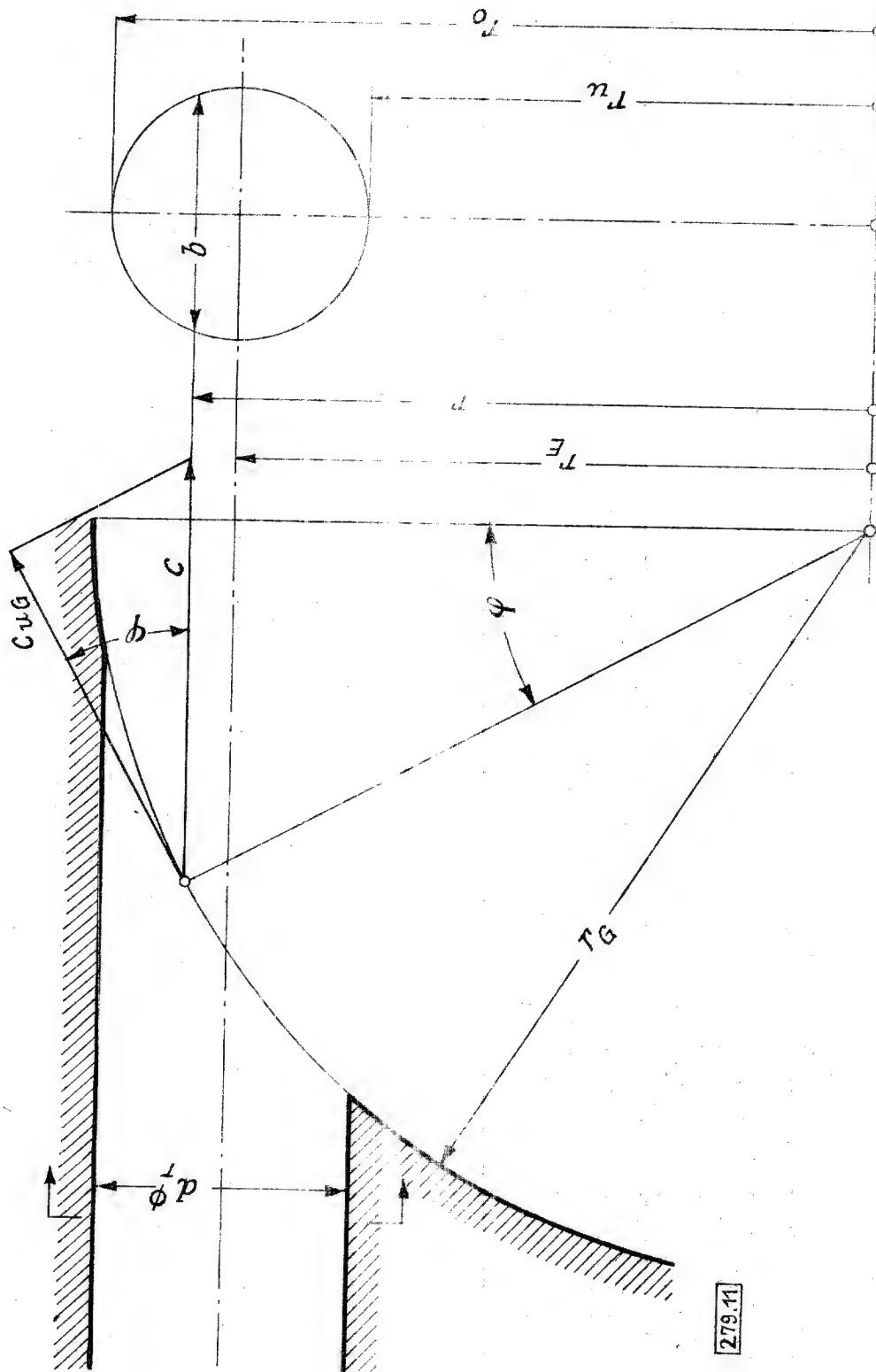
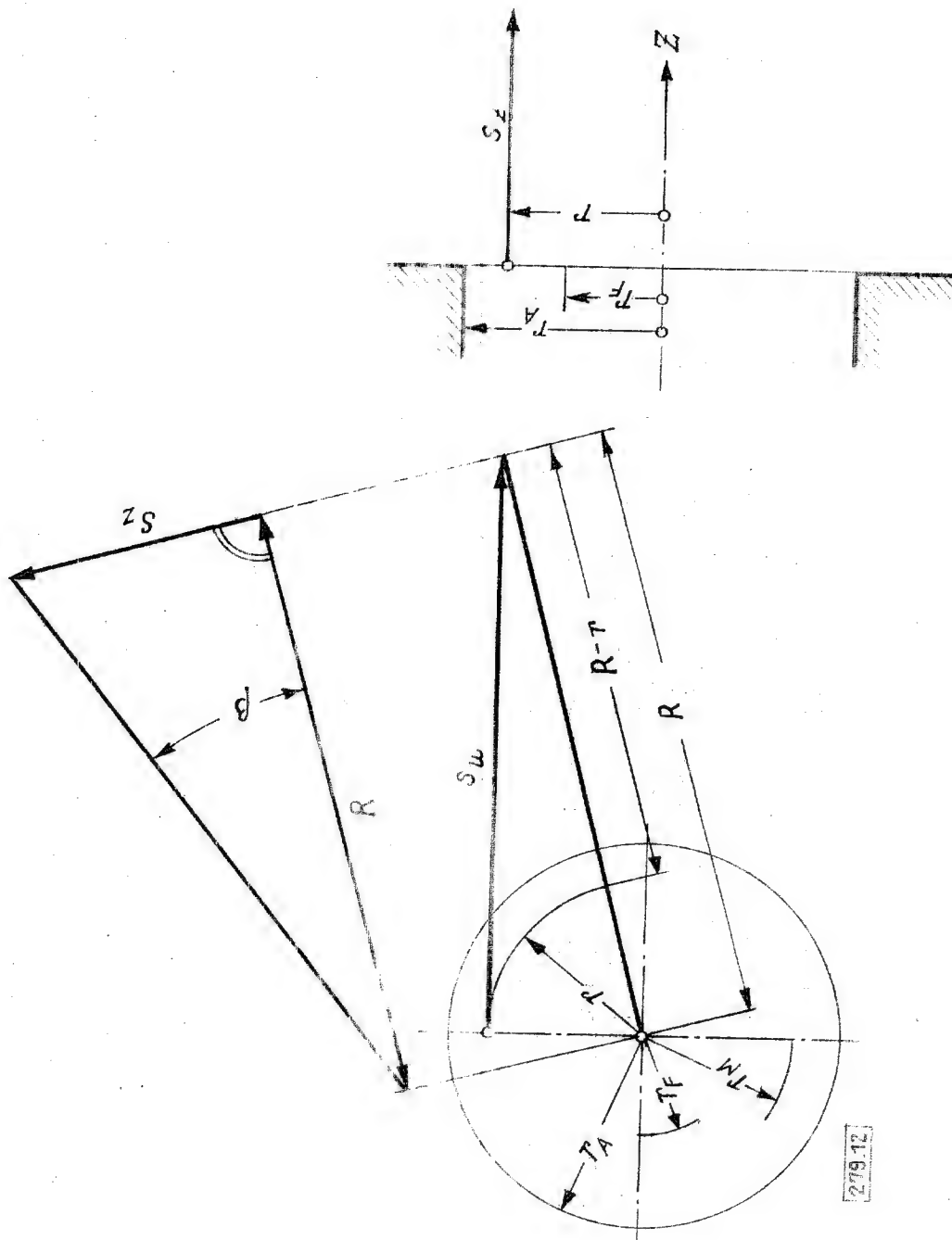


Abb. 11 Рис. 11



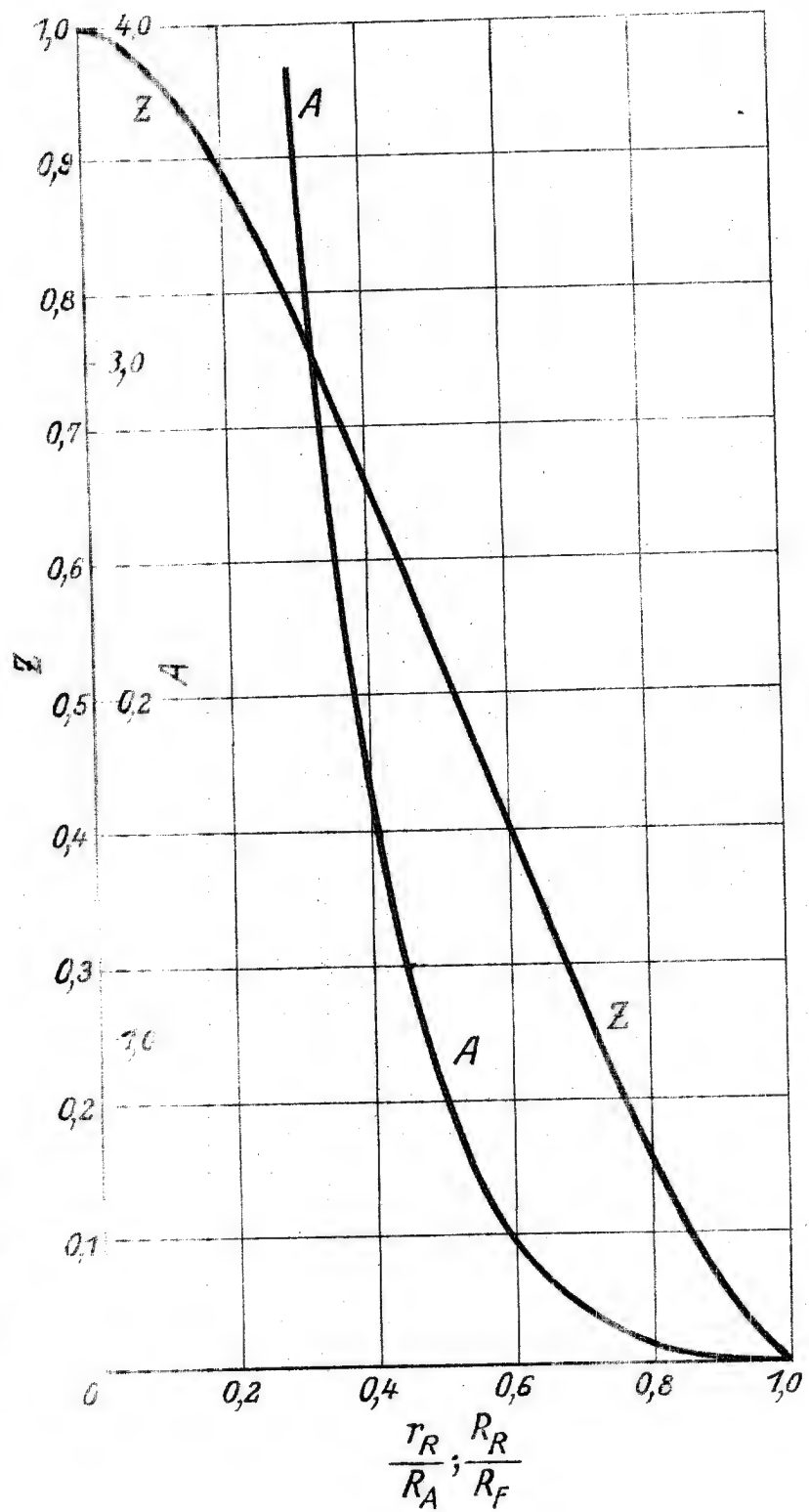
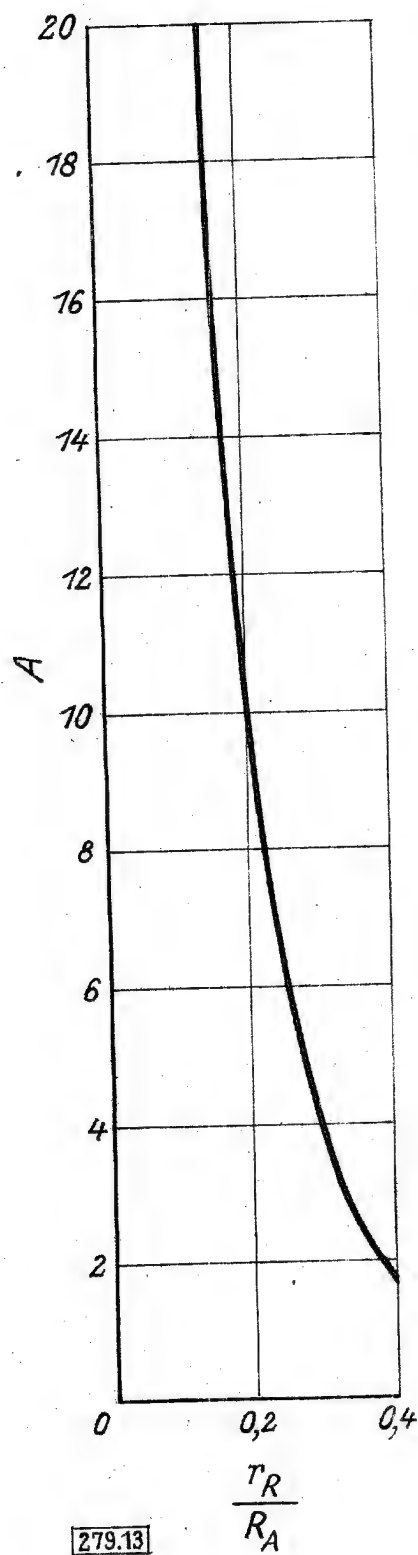


Abb.13 Рис.13

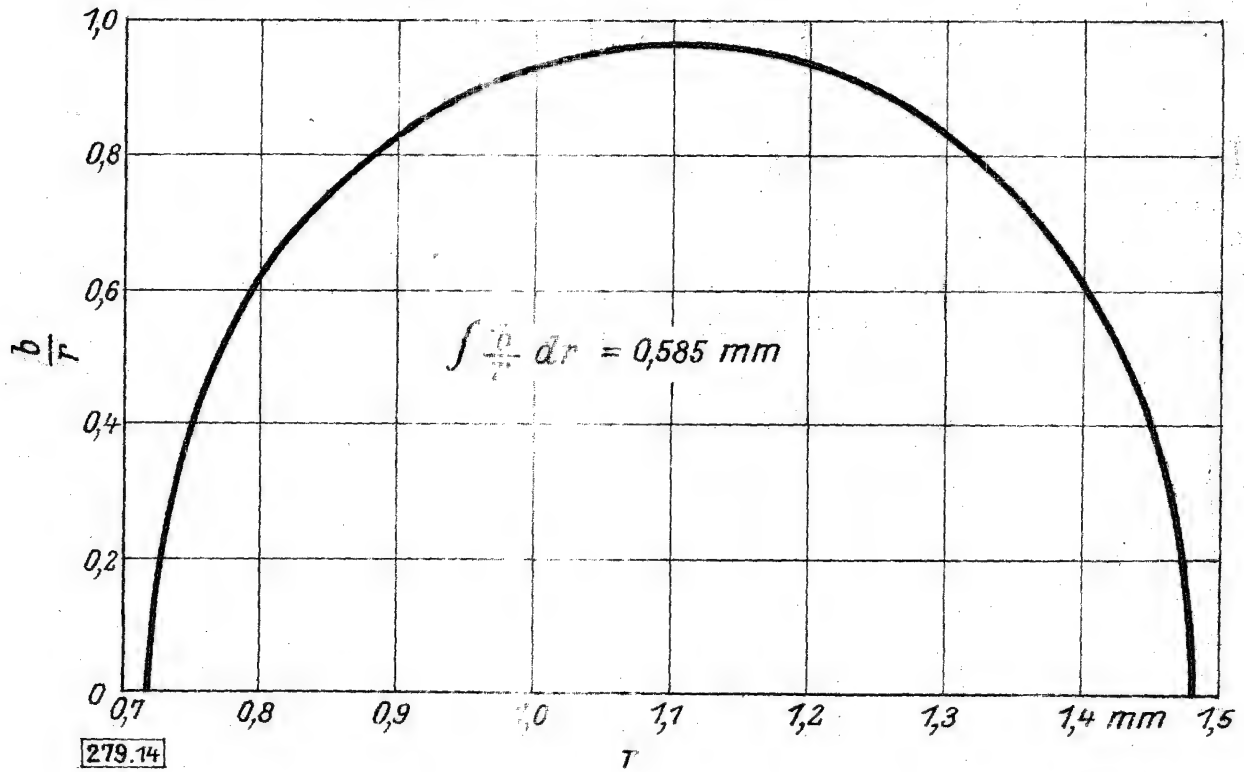


Abb.14 Рис.14

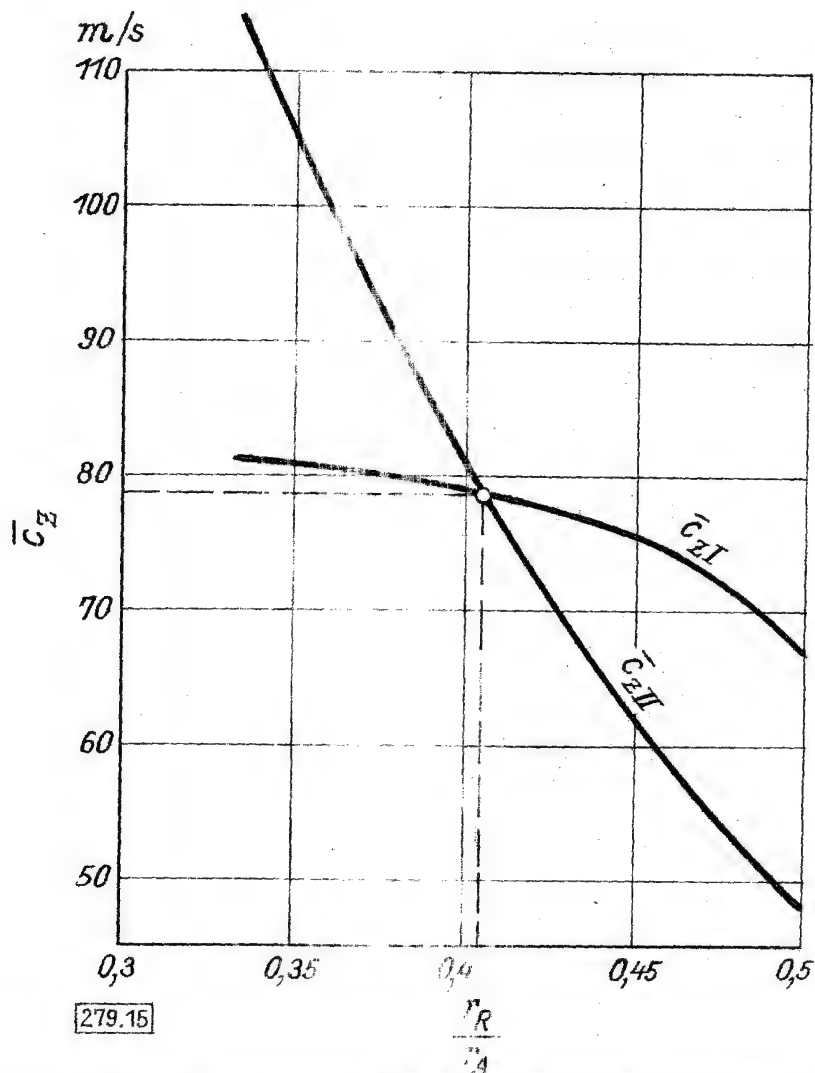


Abb.15 Рис.15

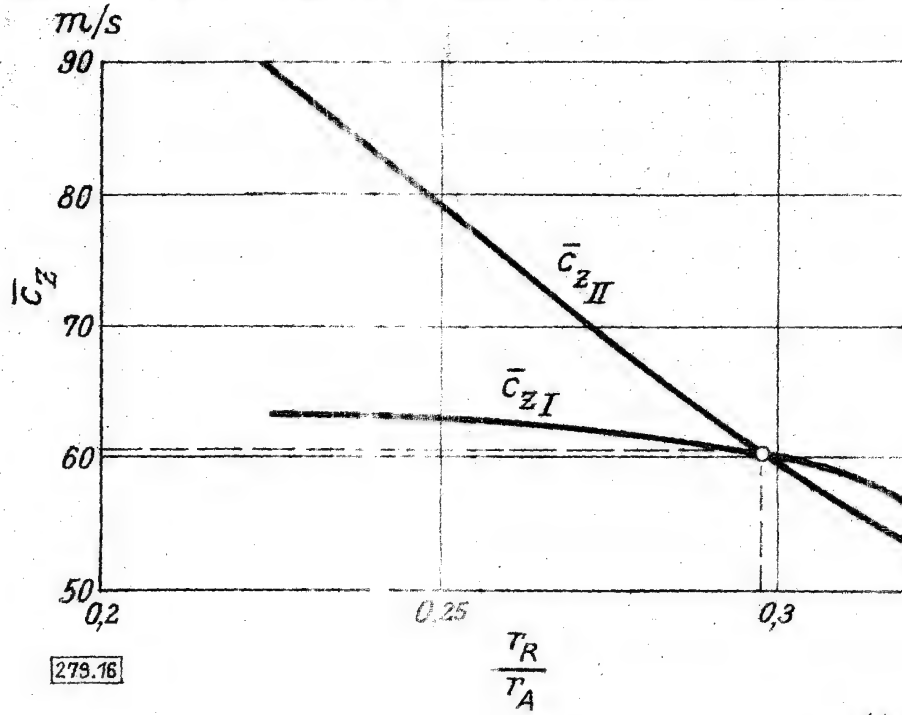


Abb.16 Рис.16

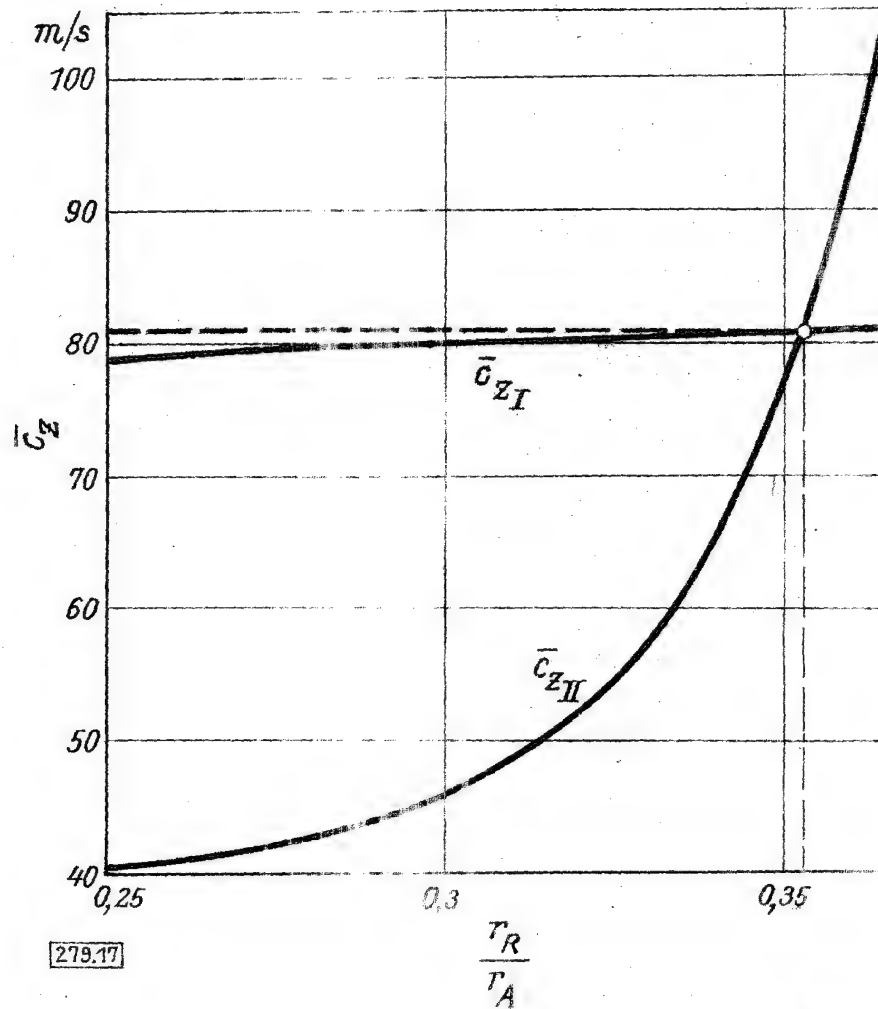


Abb.17 Рис.17

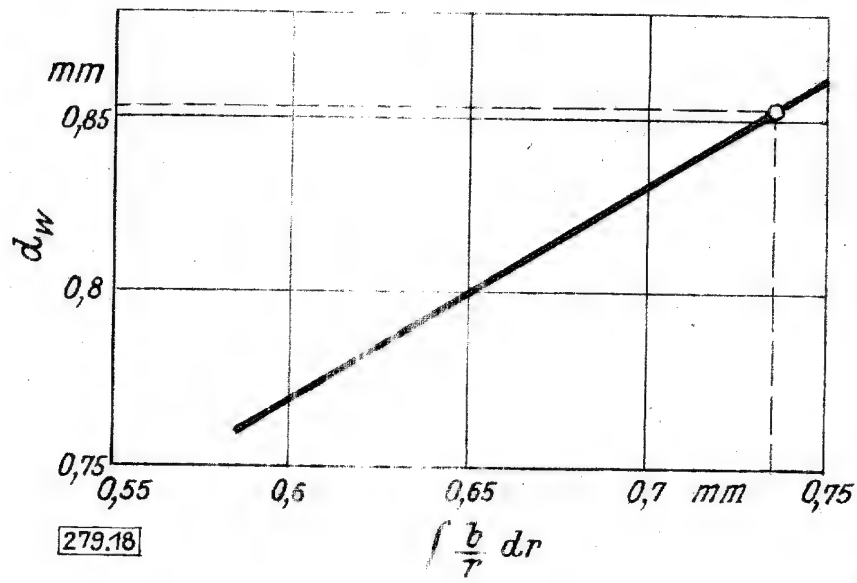


Abb.18 Рис.18

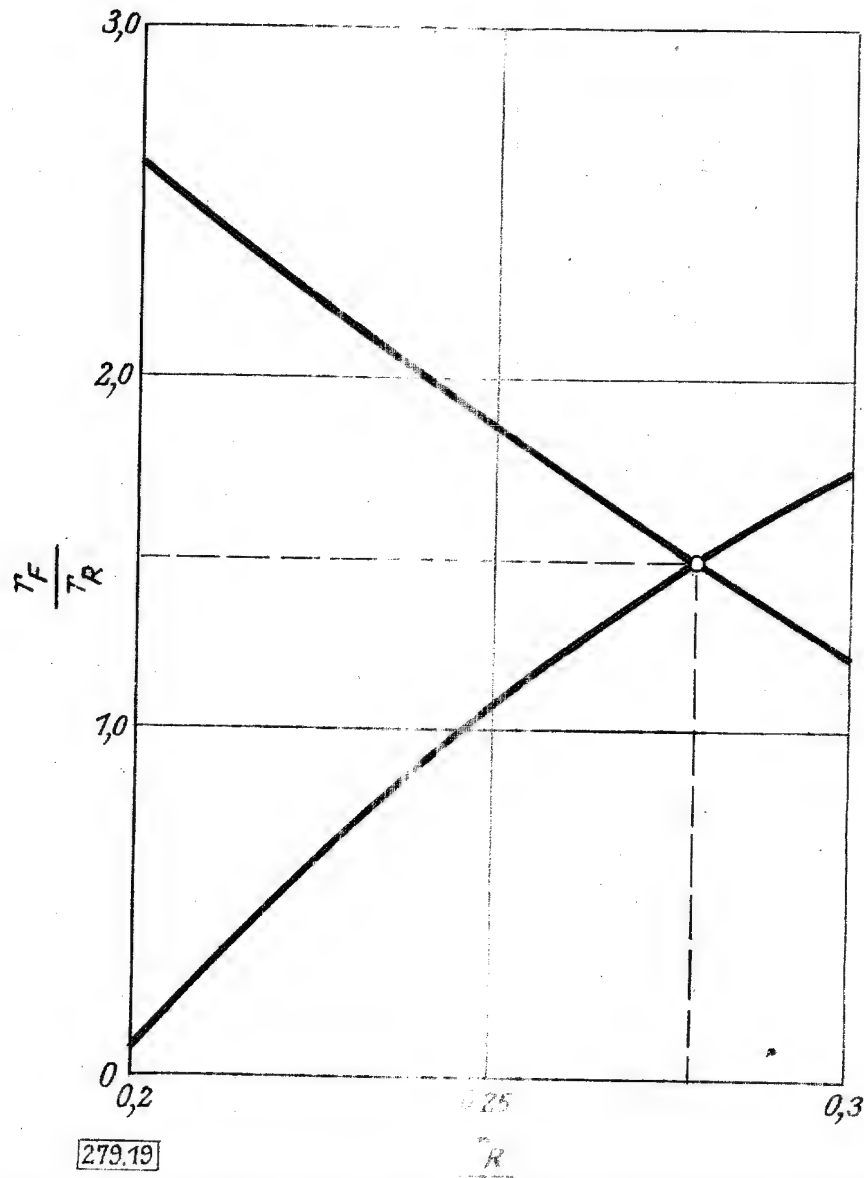
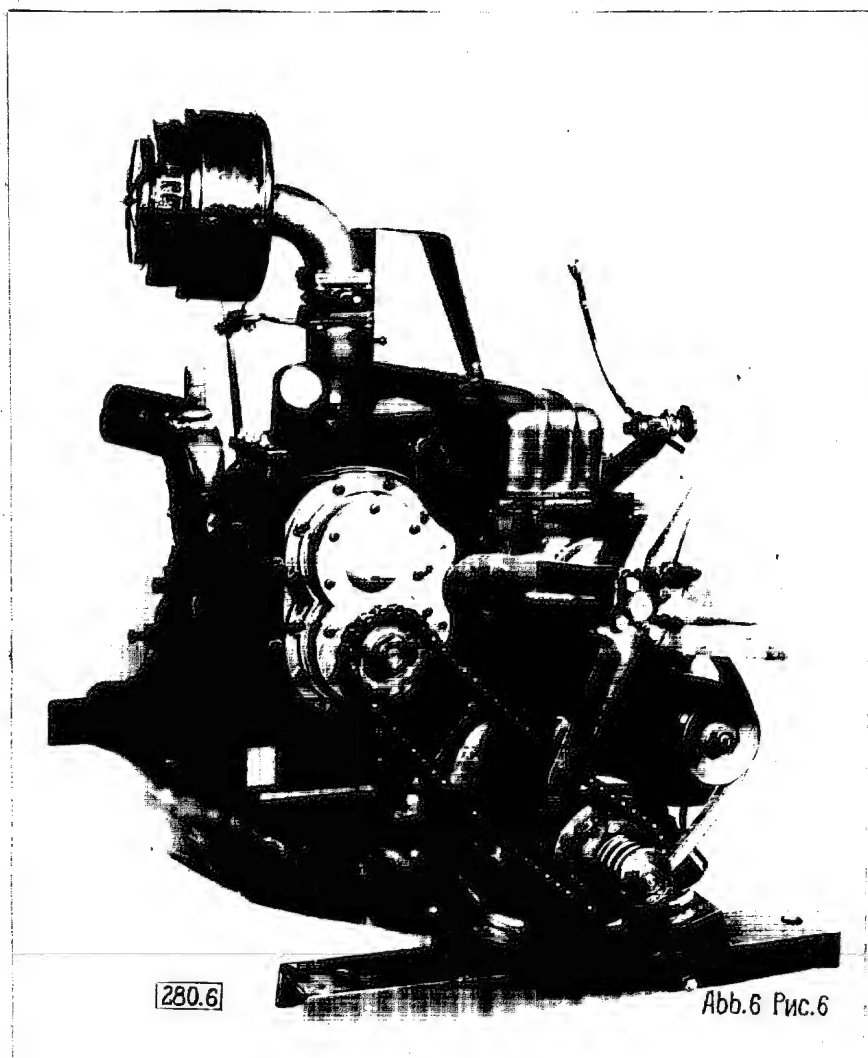
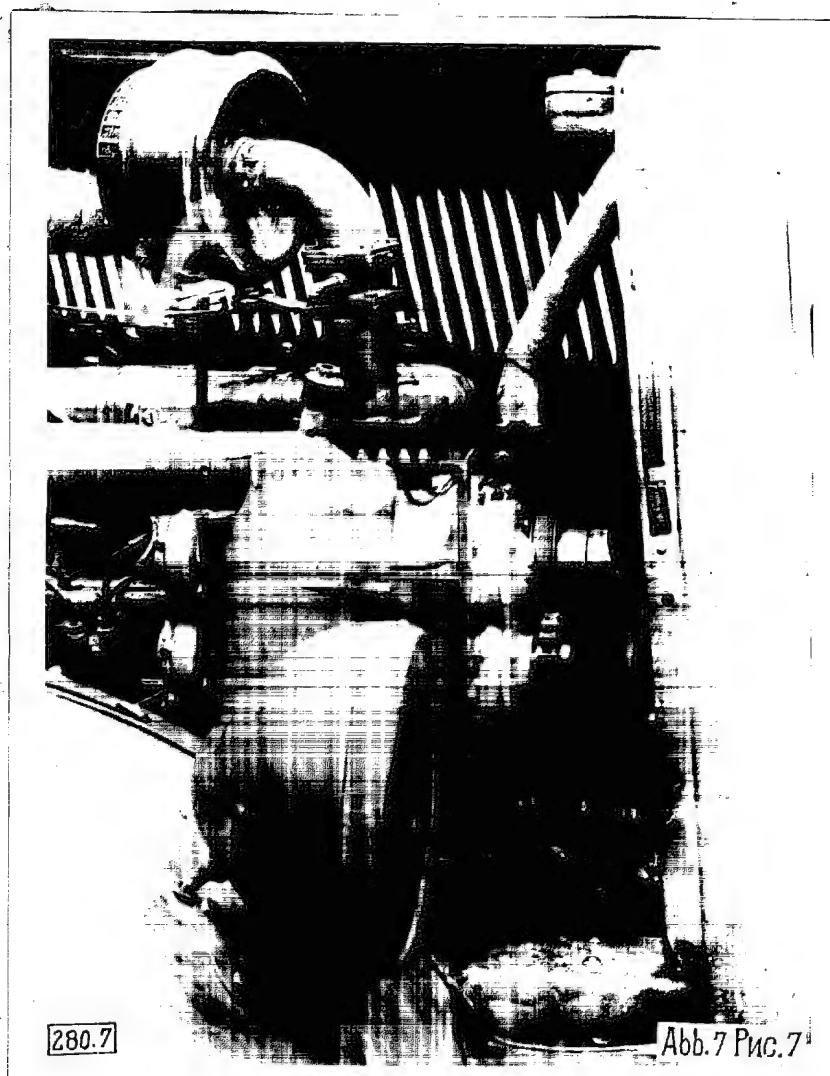
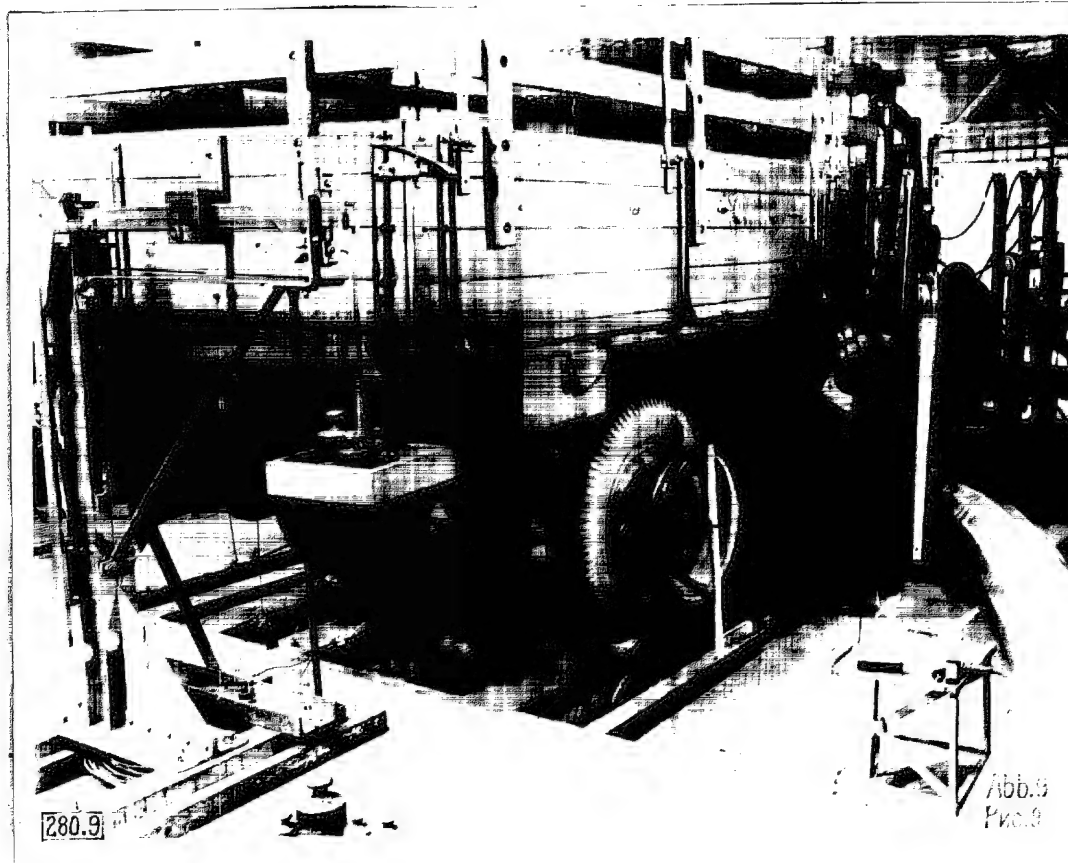


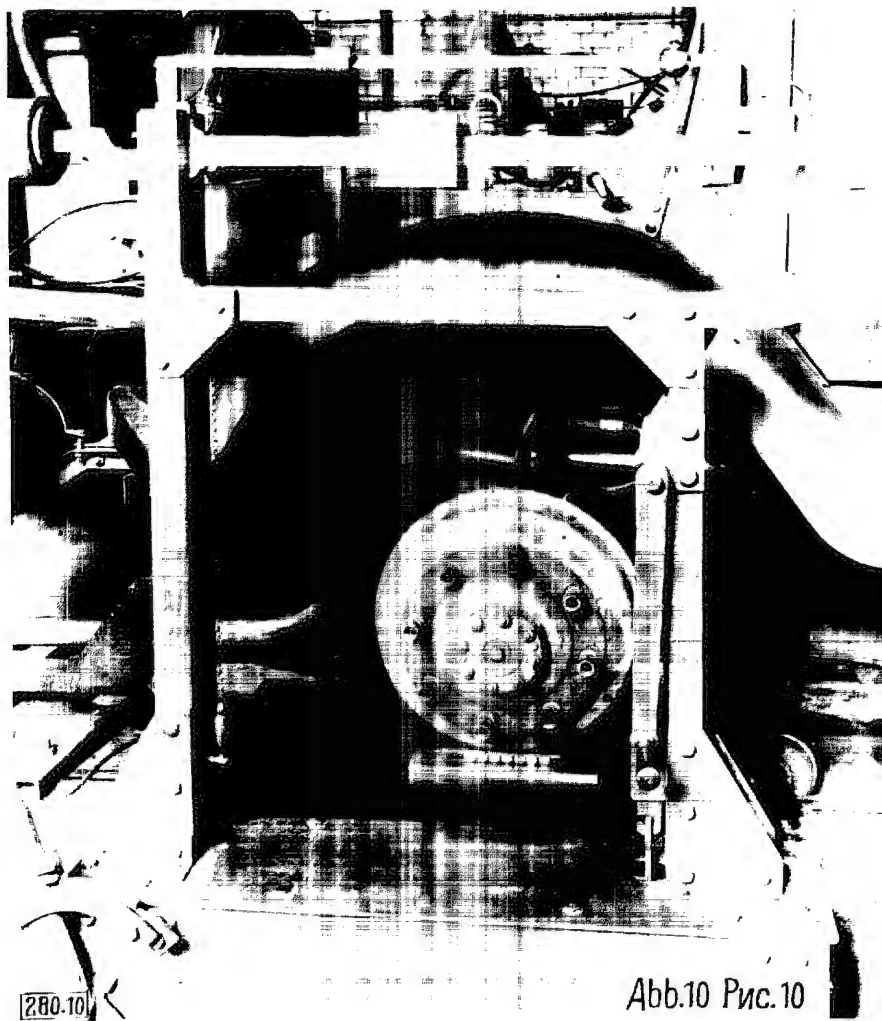
Abb.19 Рис.19











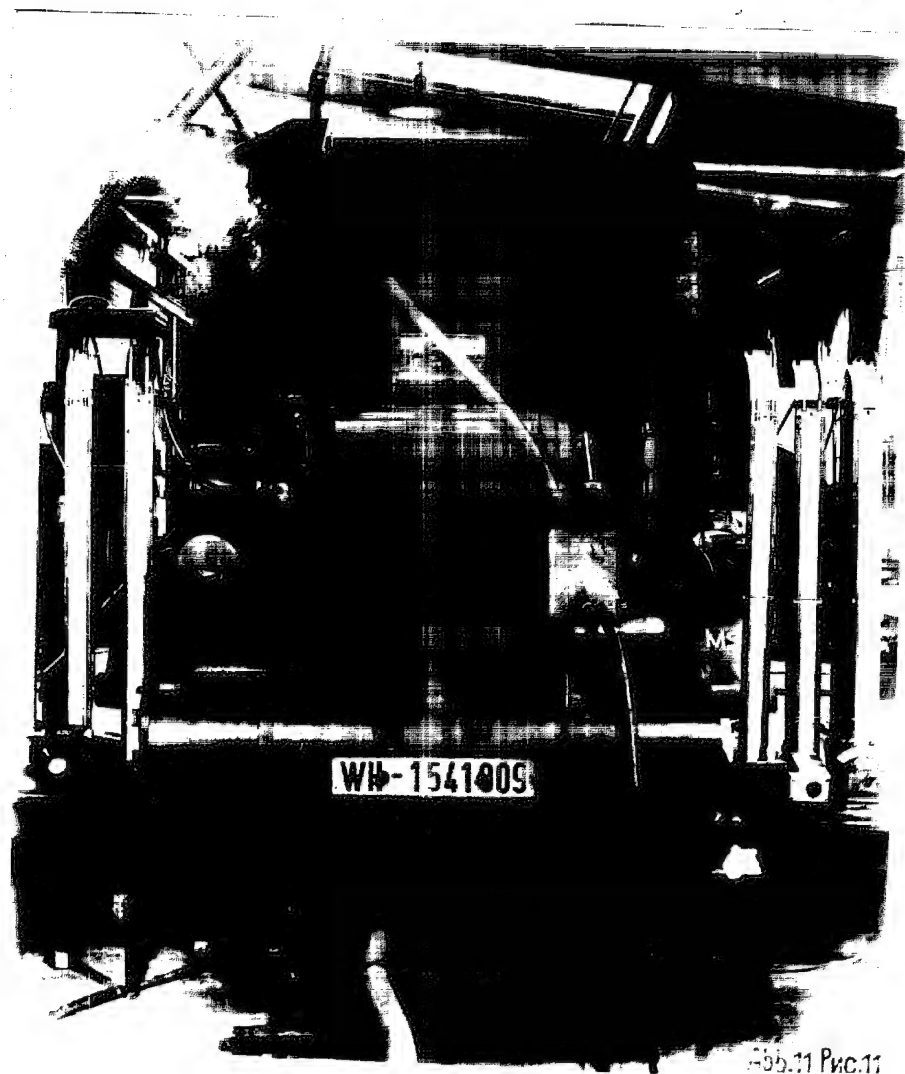


Рис. 11

*Lyfe*

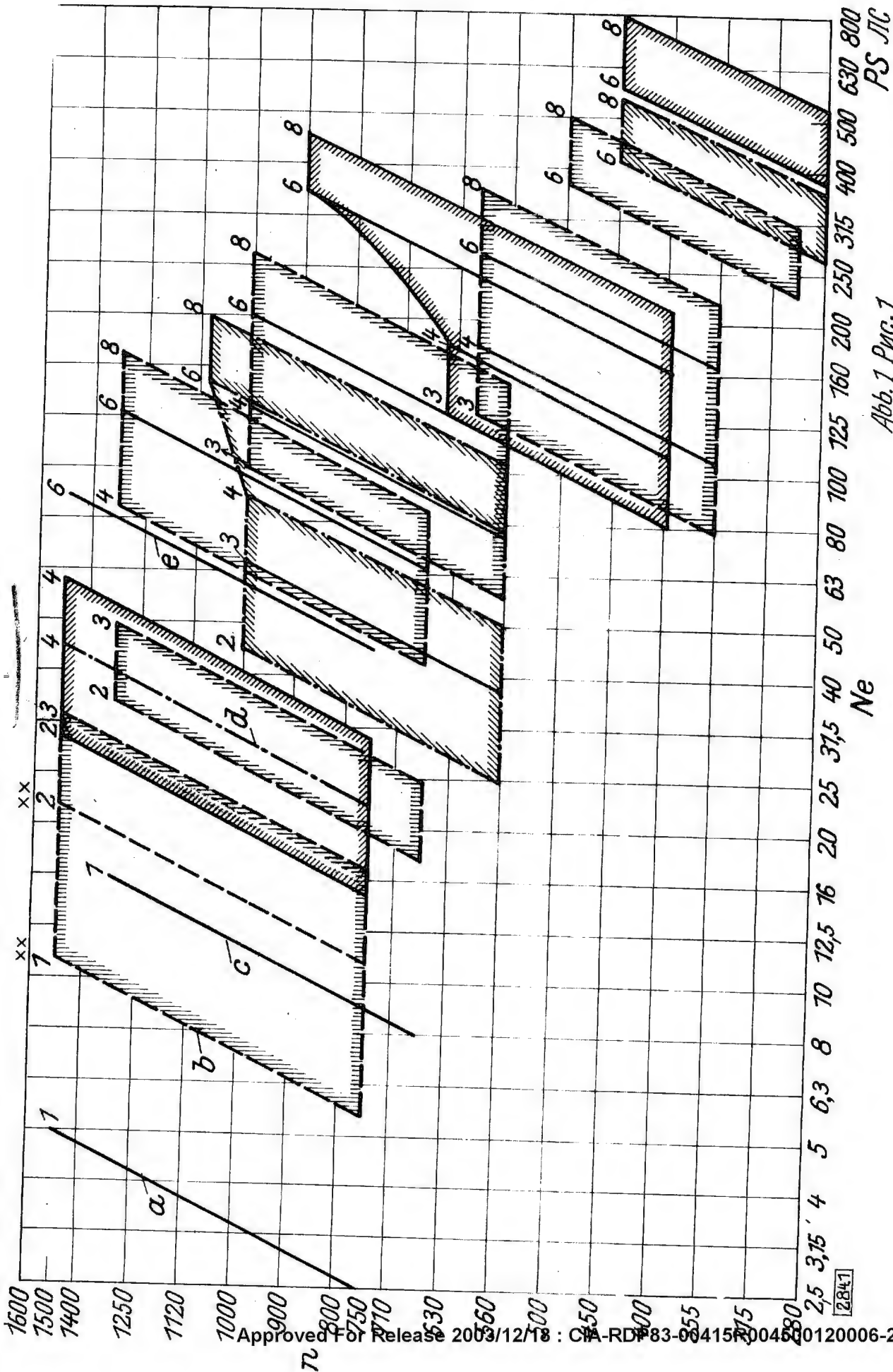
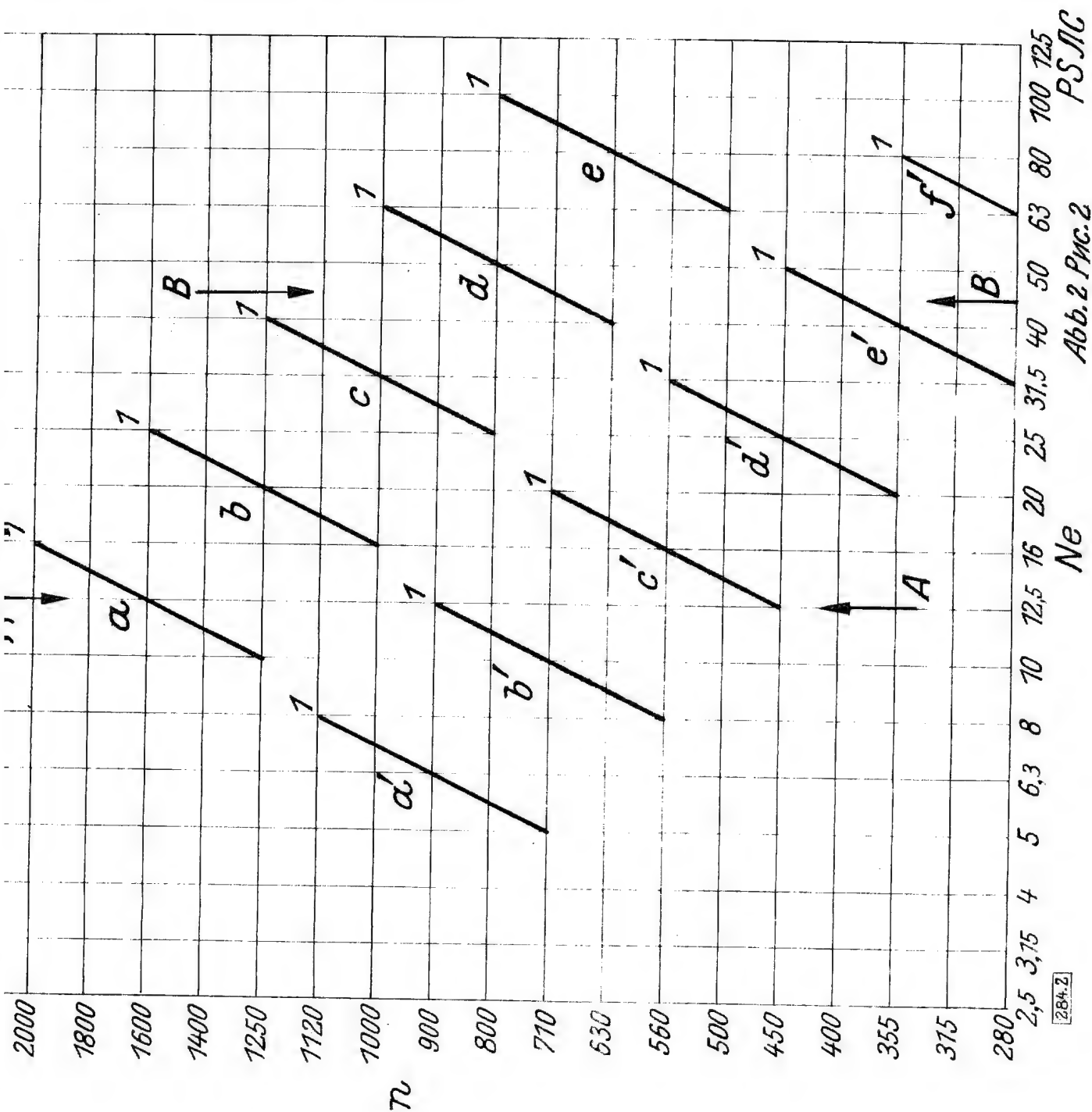


Abb. 1 Рис. 1





284.2

$N_e$

Abb. 2 Рис. 2

PSJC

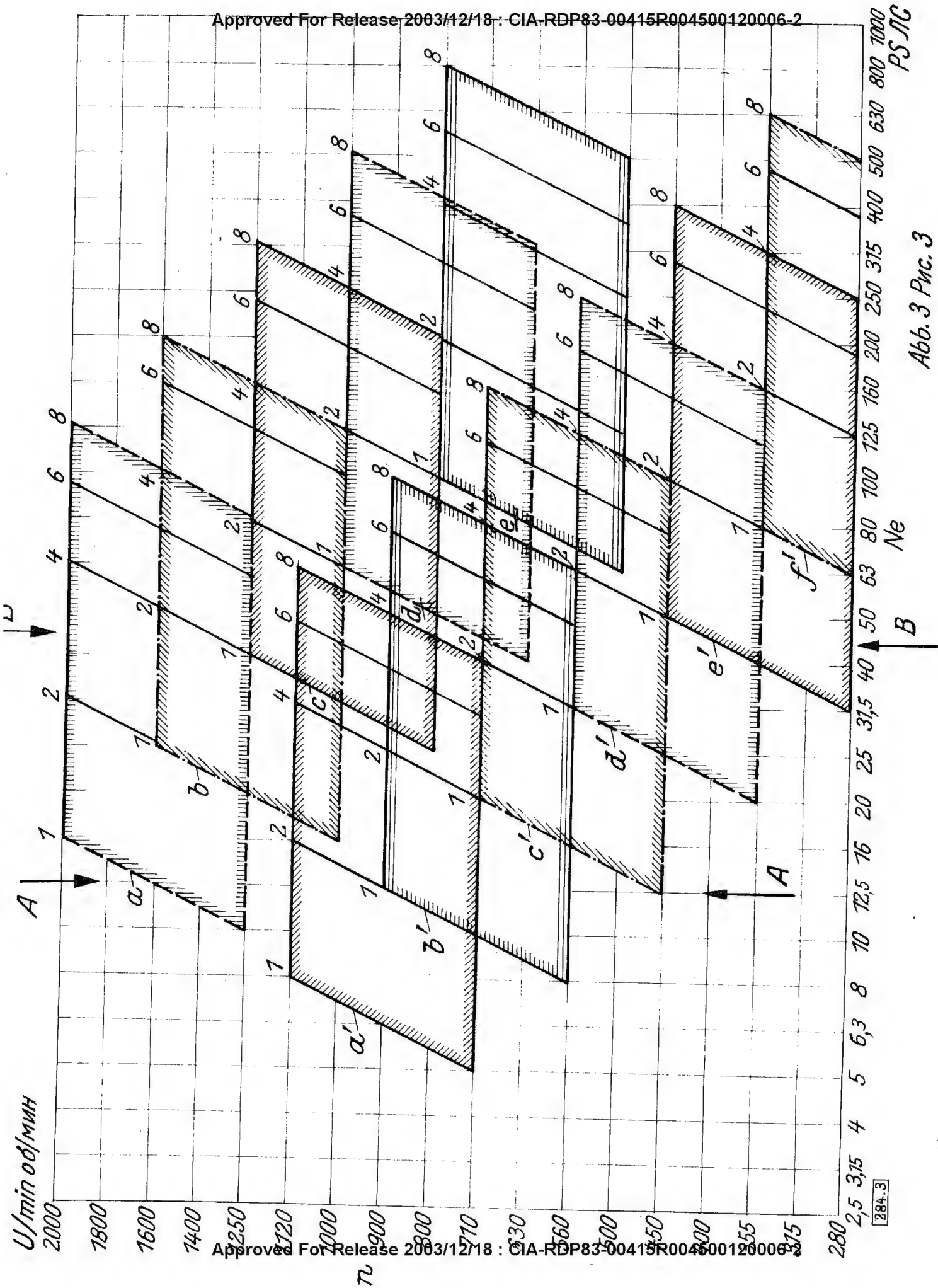


Abb. 3 Рис. 3

PSЛГ

Ne

284.3

Abb. 4 PNC. 4

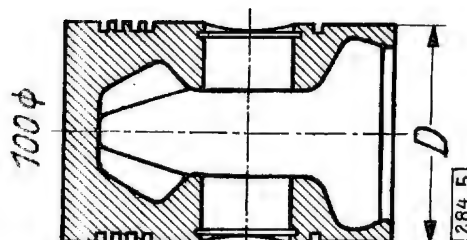
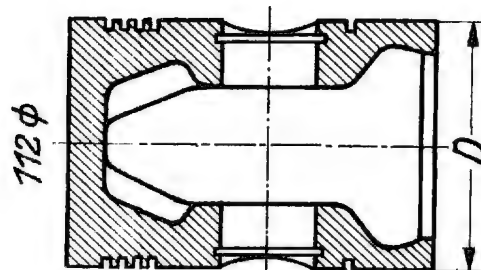
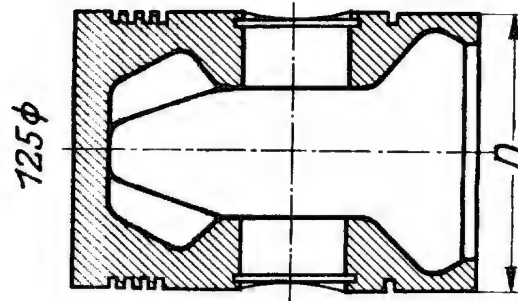
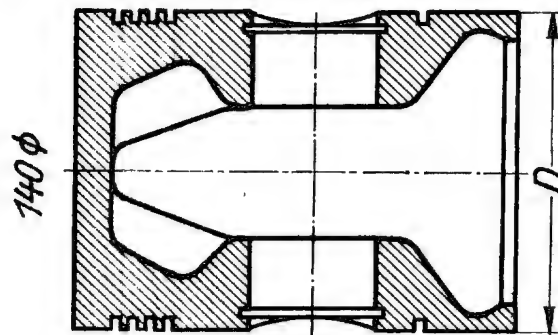
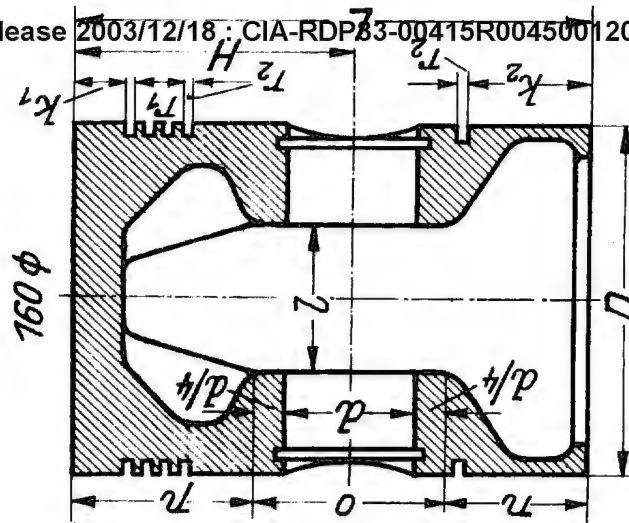
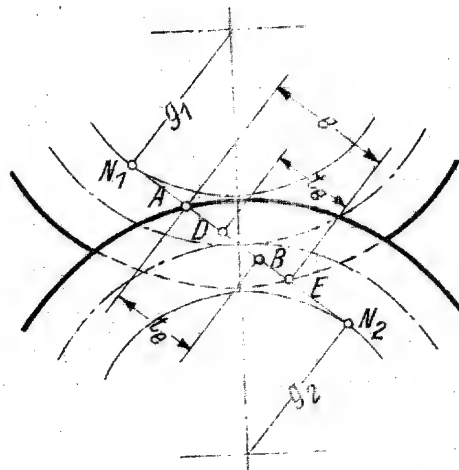


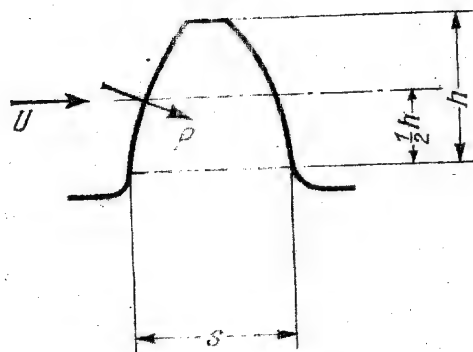
Abb. 5 Pnc. 5

Abb. 5.



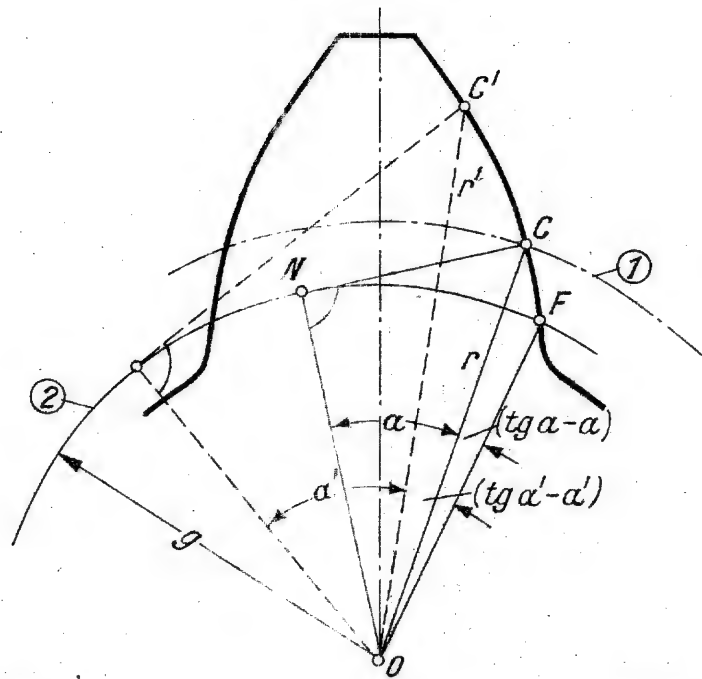
285.1

Abb.1 PNC.1



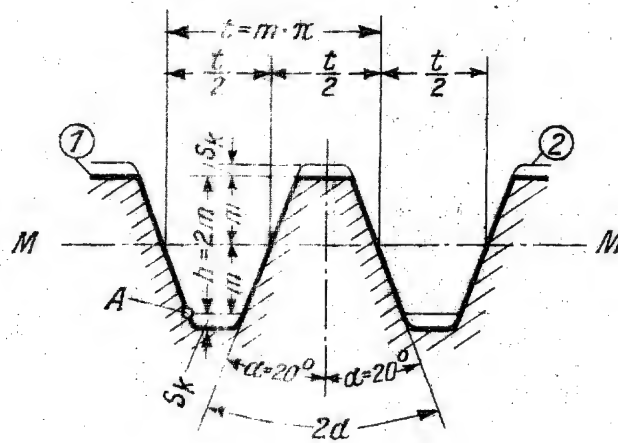
285.2

Abb.2 PNC.2



285.4

Abb. 4 PNC.4



285.3

Abb. 3 PNC.3



285.5

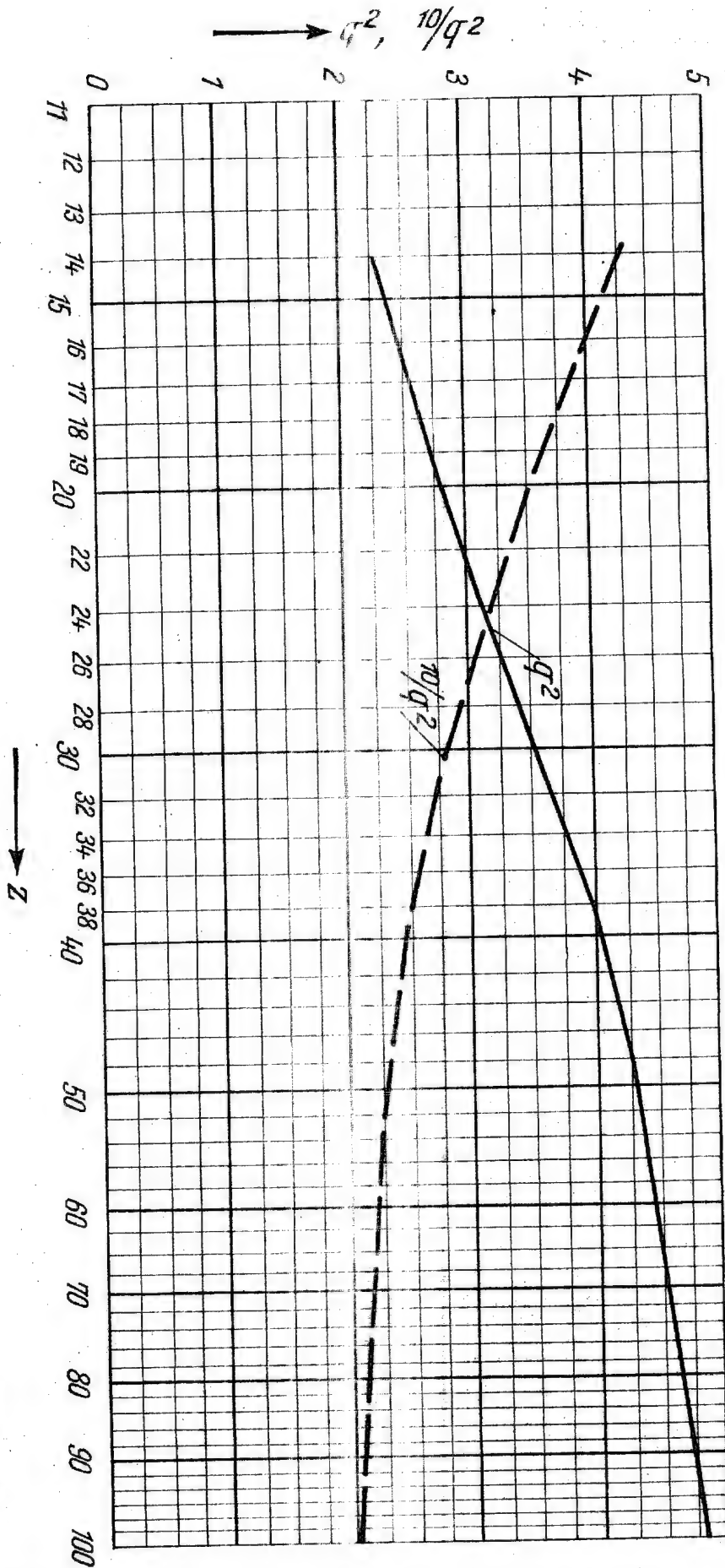


Abb. 5 PNC. 5

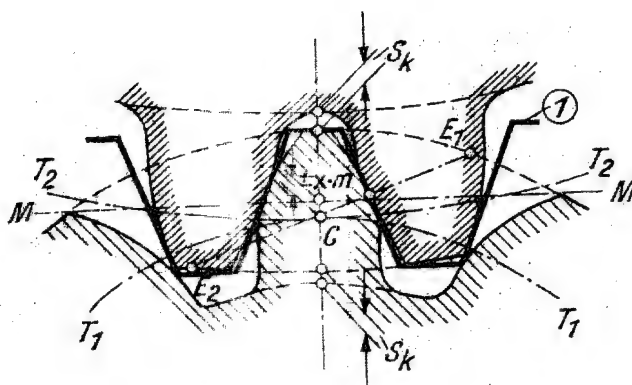


Abb. 6 Рис. 6

285.6

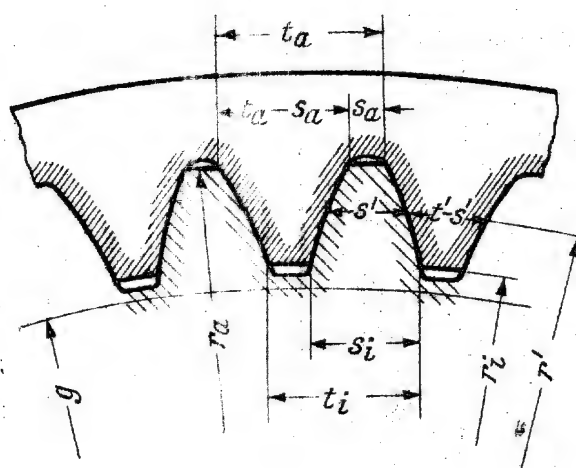
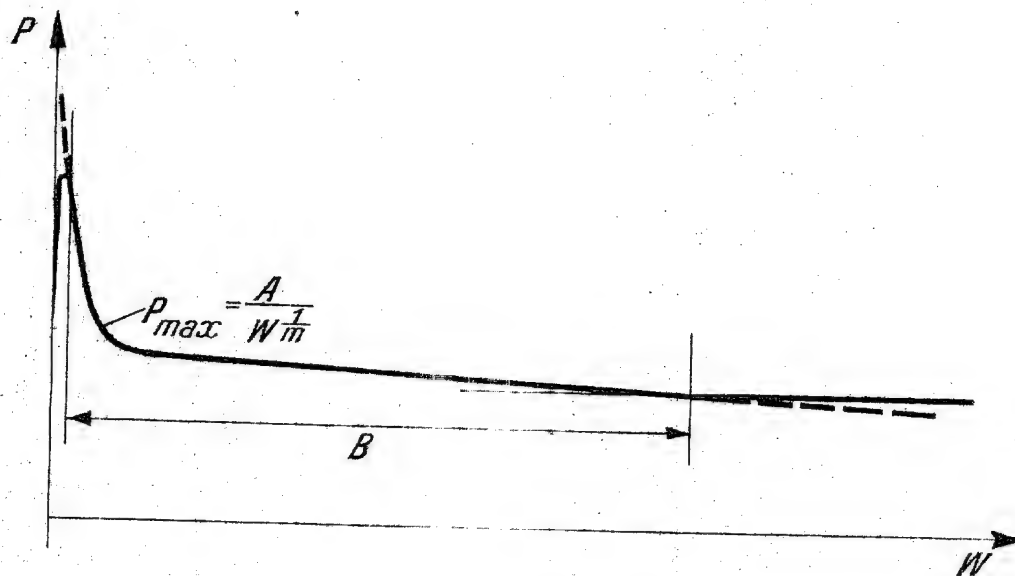


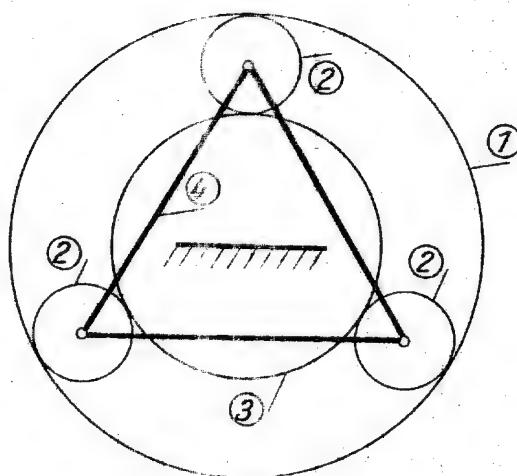
Abb. 7 Рис. 7

285.7



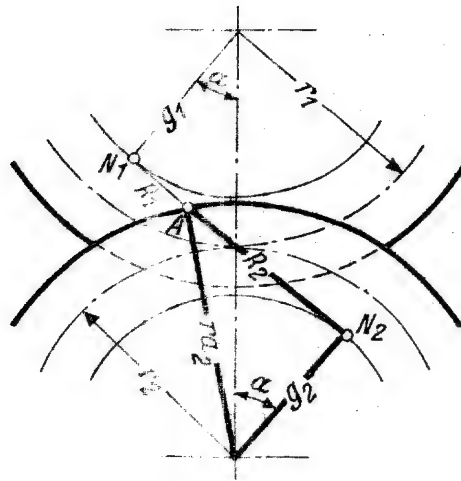
285.9

Abb. 9 PIC. 9



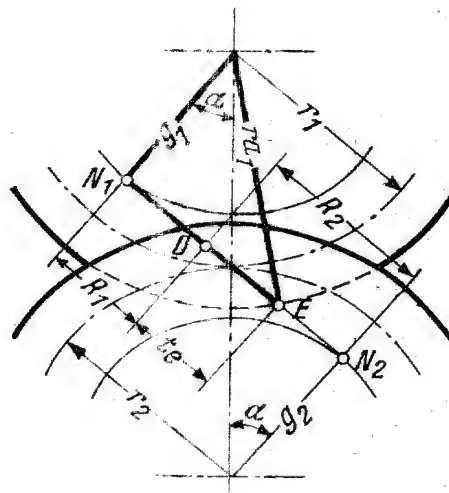
285.8

Abb. 8 PIC. 8



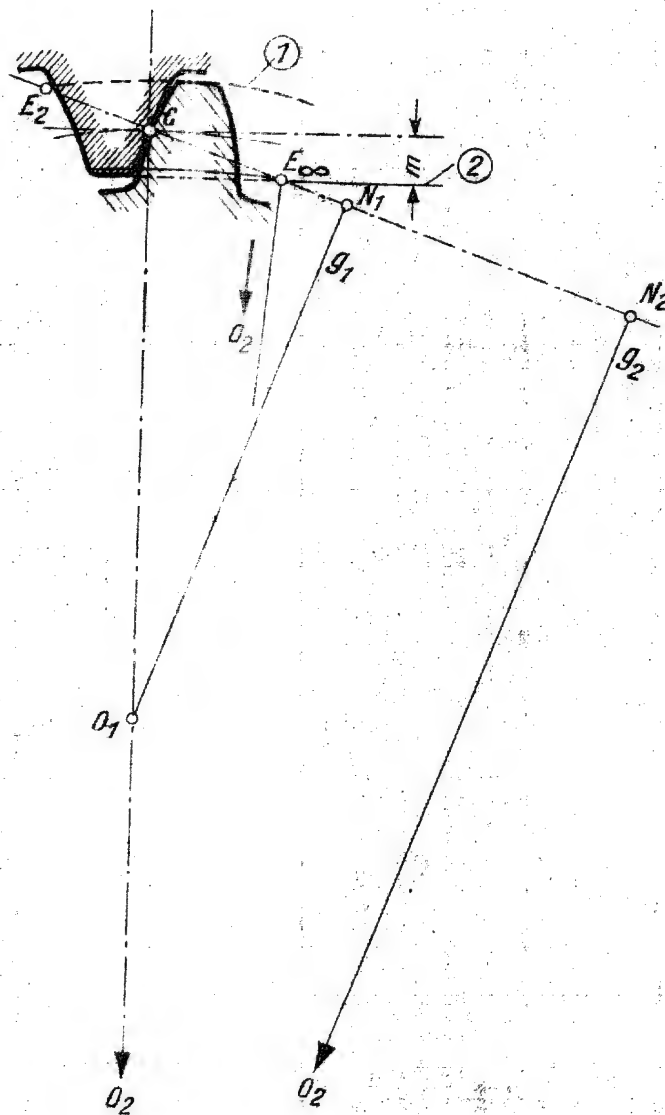
285.10

Abb. 10 PNC.10



285.11

Abb. 11 PNC.11

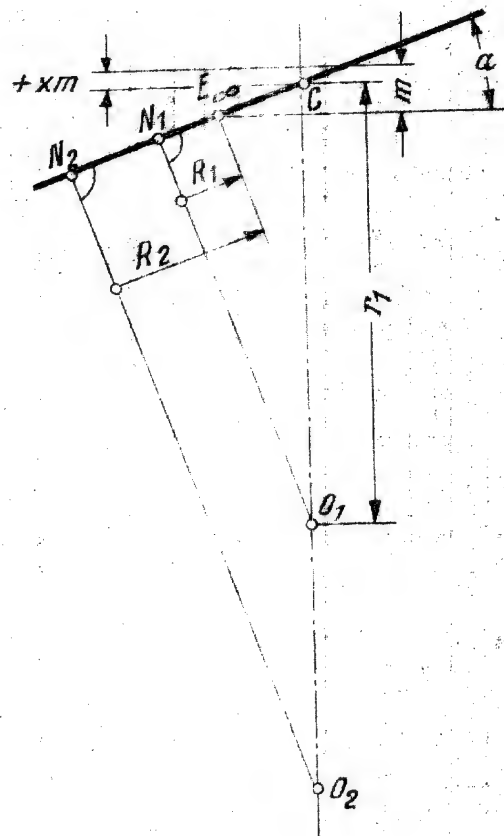


285.12

Abb. 12 PNC 12

## Releas





285.15

Abb. 15 PNC. 15

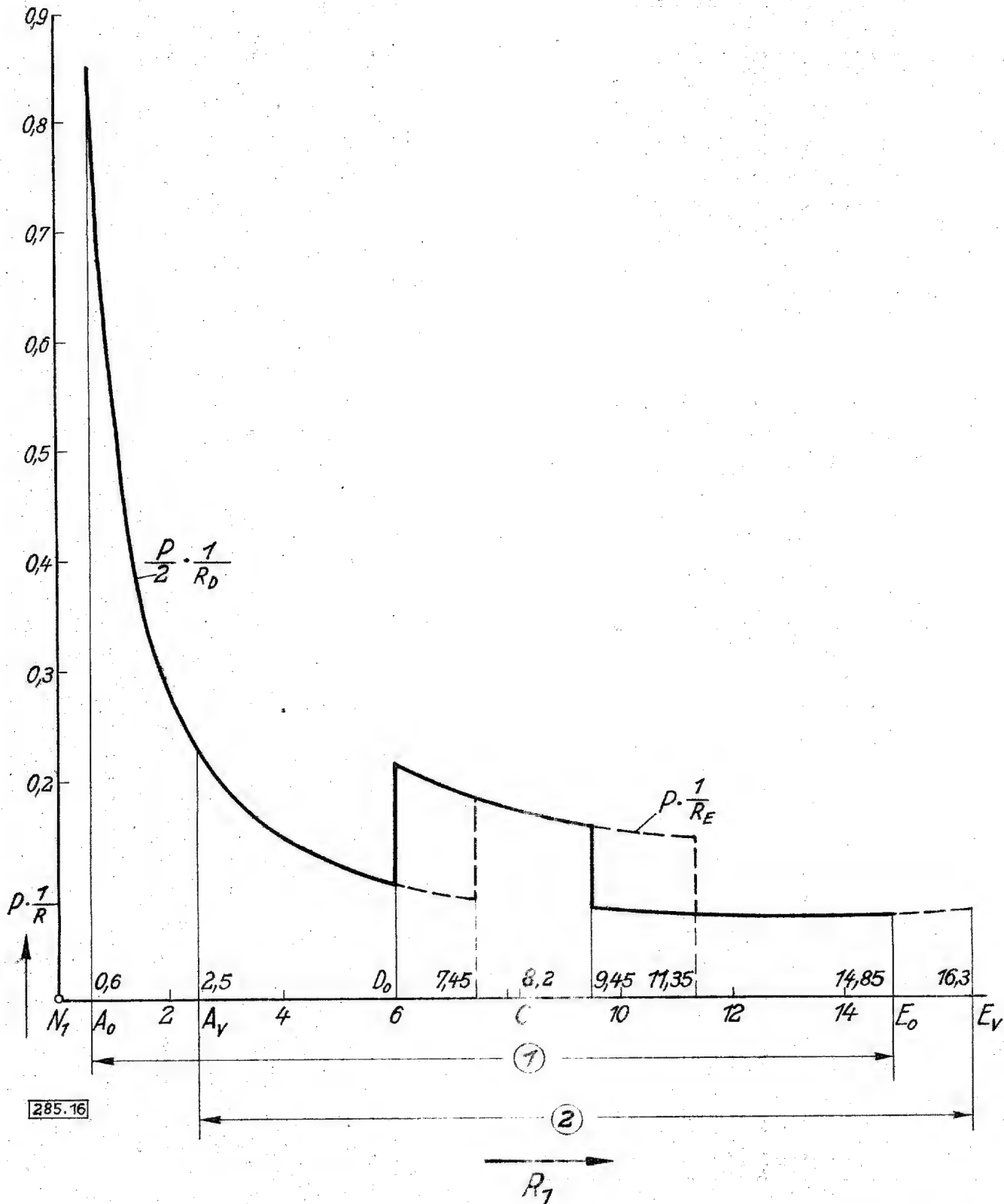
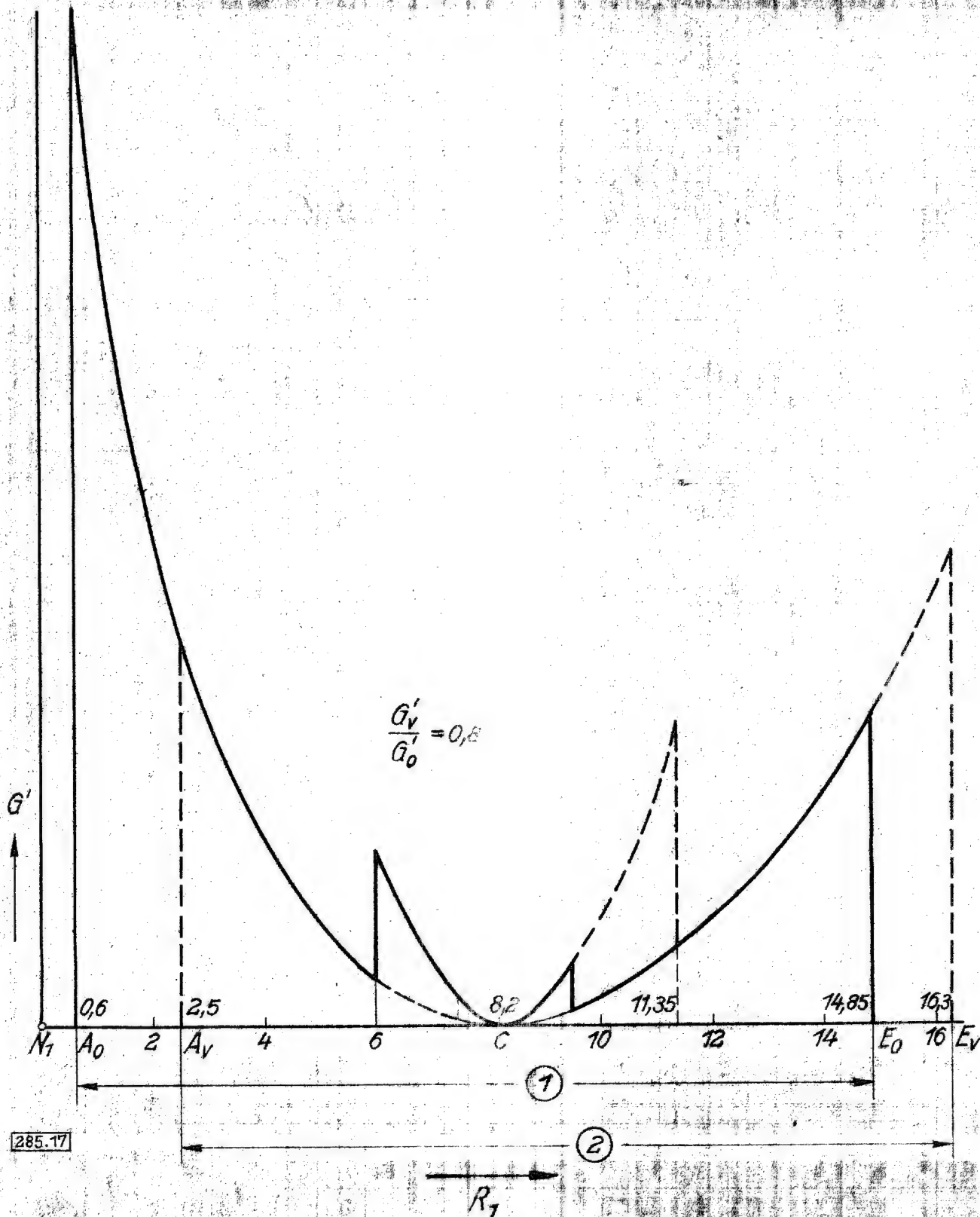


Abb. 16 Pnc. 16



Formeln für die Krümmungszahlen an Null- und V-Nullrädern  
 формулы коэффициента кривизны нулевых и V-нулевых зубчатых колес

Nullräder нулевые зубчатые колеса	Außen-Getriebe внешнее сцепление	$R_2 = r_1 \cdot \sqrt{i^2 \cdot \sin^2 \alpha + \frac{4i}{z_1} + \frac{4}{z_1^2}}$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_2 [(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha - R_2]}$
		$R_1 = r_1 \cdot \left[ \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{4}{z_1} + \frac{4}{z_1^2}} - \frac{2\pi \cdot \cos \alpha}{z_1} \right]$
	Innen-Getriebe внутреннее сцепление	$\frac{1}{R_E} = \frac{(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha - R_1]}$
		$R_1 = m \cdot \left( \frac{z_1}{2} \sin \alpha - \frac{1}{\sin \alpha} \right)$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i-1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i-1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha + R_1]}$
V-Nullräder V-нуль-зубчатые колеса	Außen-Getriebe внешнее сцепление	$R_2 = r_1 \cdot \sqrt{i^2 \cdot \sin^2 \alpha + \frac{4i}{z_1} (1-x) + \frac{4}{z_1^2} (1-x)^2}$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_2 [(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha - R_2]}$
		$R_1 = r_1 \cdot \left[ \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{4}{z_1} (1+x) + \frac{4}{z_1^2} (1+x)^2} - \frac{2\pi \cdot \cos \alpha}{z_1} \right]$
	Innen-Getriebe внутреннее сцепление	$\frac{1}{R_E} = \frac{(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha - R_1]}$
		$R_1 = m \cdot \left[ \frac{z_1}{2} \sin \alpha - \frac{(1-x)}{\sin \alpha} \right]$
		$\frac{1}{R_D} = \frac{(i-1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i-1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha + R_1]}$
V-Nullräder V-нуль-зубчатые колеса	Außen-Getriebe внешнее сцепление	$R_2 = r_1 \cdot \left[ \sqrt{\sin^2 \alpha + \frac{4}{z_1} (1+x) + \frac{4}{z_1^2} (1+x)^2} - \frac{2\pi \cdot \cos \alpha}{z_1} \right]$
		$\frac{1}{R_E} = \frac{(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha - R_1]}$
		$R_1 = m \cdot \left[ \frac{z_1}{2} \sin \alpha - \frac{(1-x)}{\sin \alpha} \right]$
	Innen-Getriebe внутреннее сцепление	$\frac{1}{R_D} = \frac{(i-1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i-1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha + R_1]}$
		$R_1 = m \cdot \left[ \frac{z_1}{2} \sin \alpha - \frac{(1-x)}{\sin \alpha} \right]$
		$\frac{1}{R_E} = \frac{(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha}{R_1 [(i+1) \cdot r_1 \cdot \sin \alpha - R_1]}$

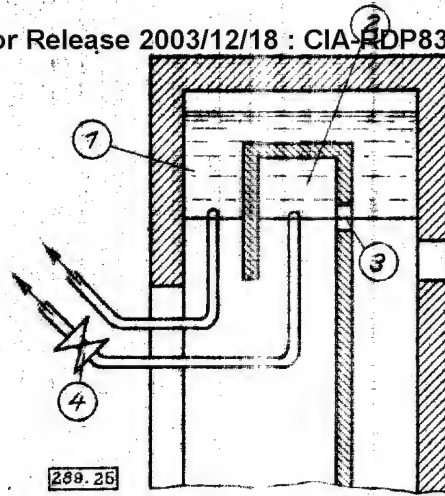
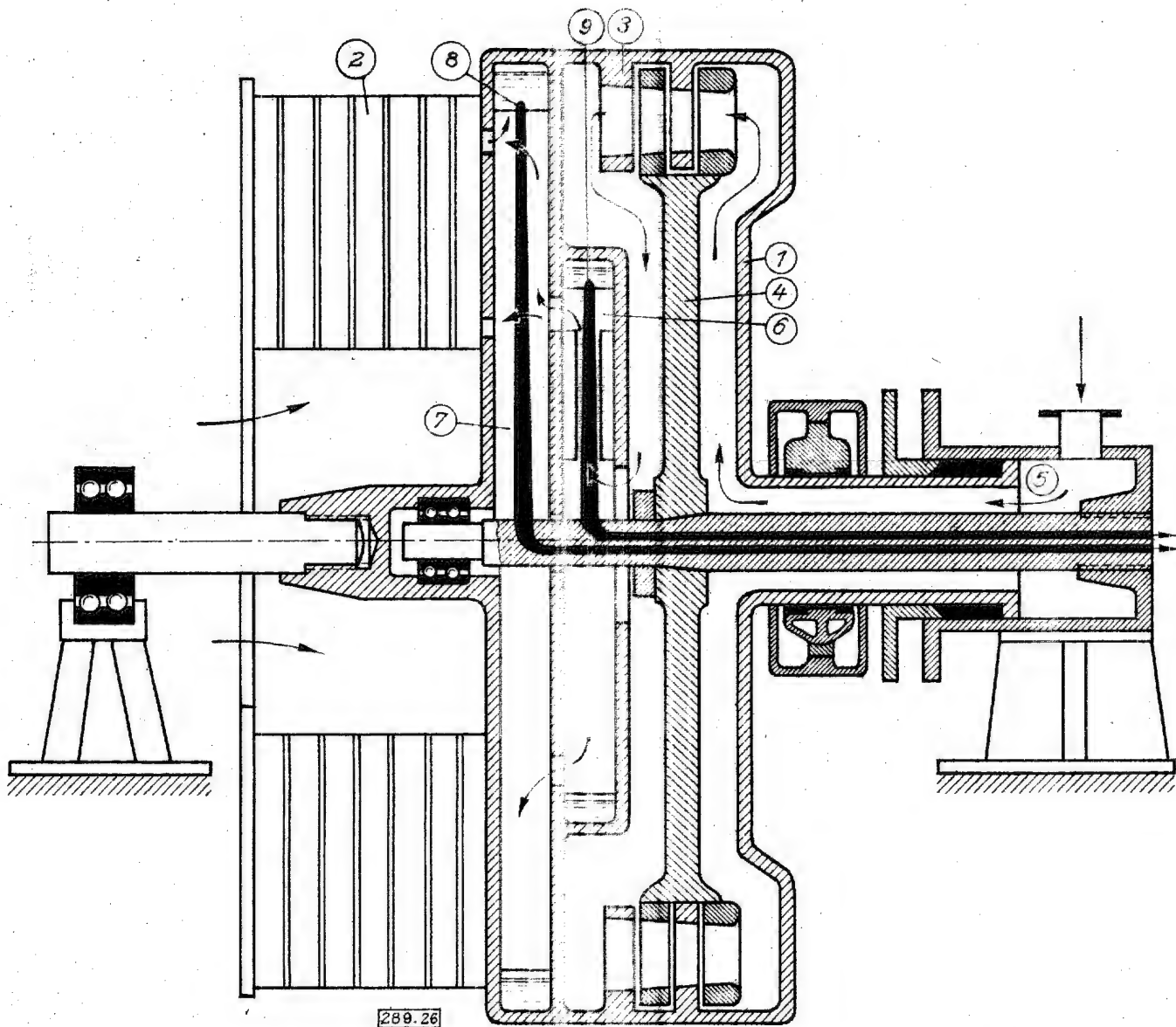


Abb. 25 Рис. 25



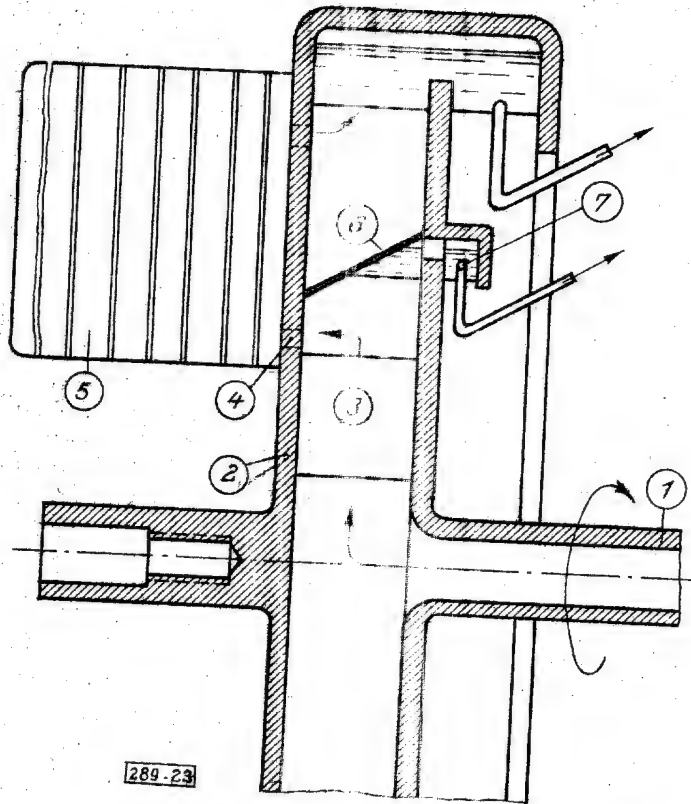


Abb. 23 Рис. 23

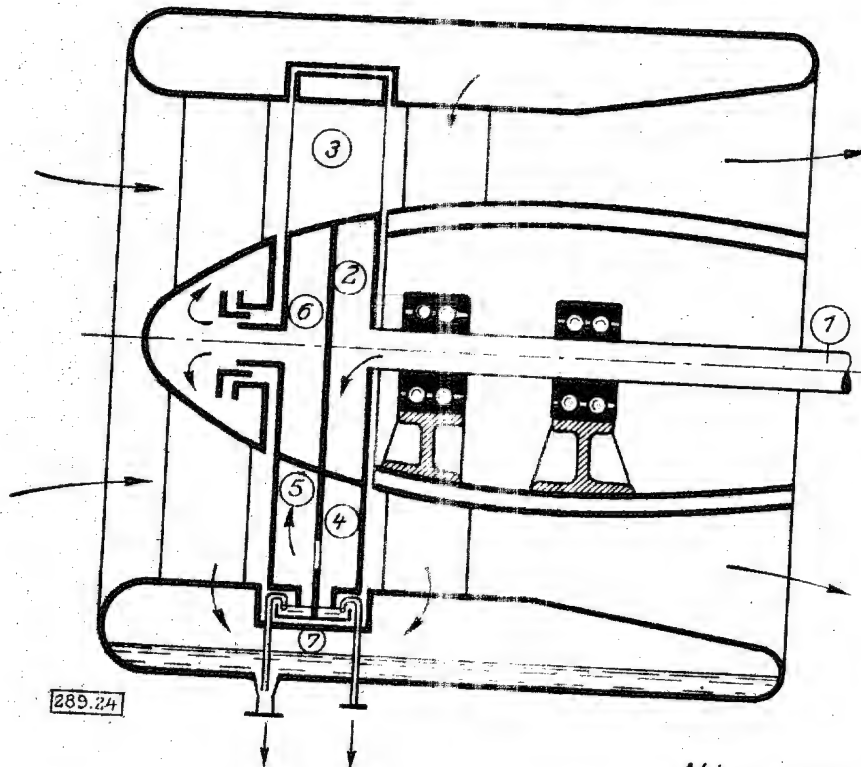
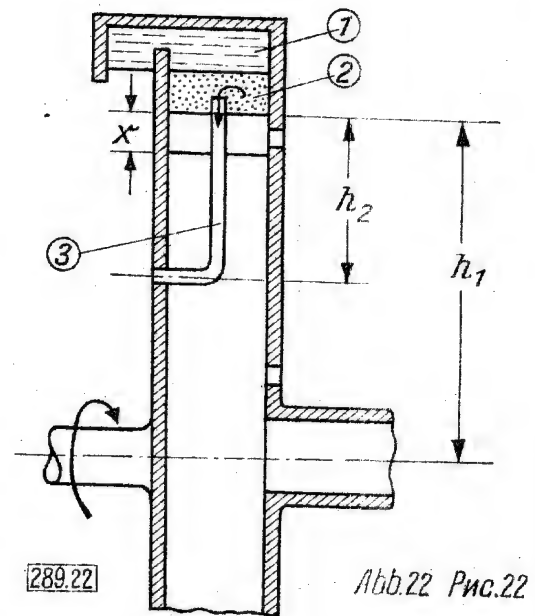
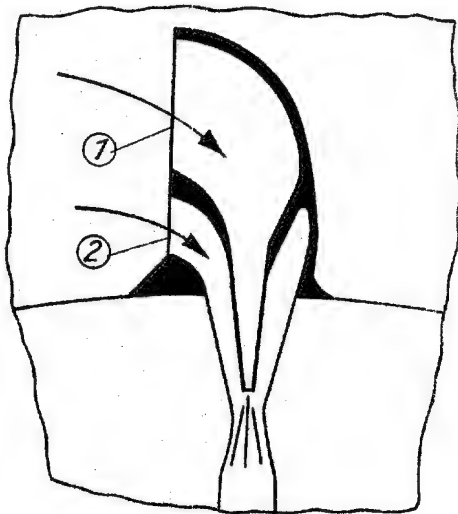
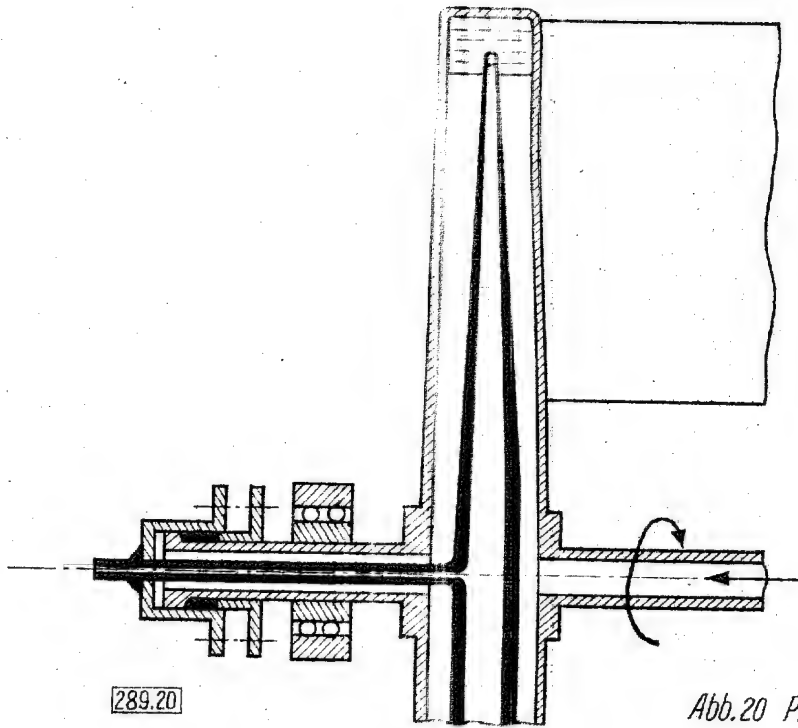


Abb. 24 Рис. 24





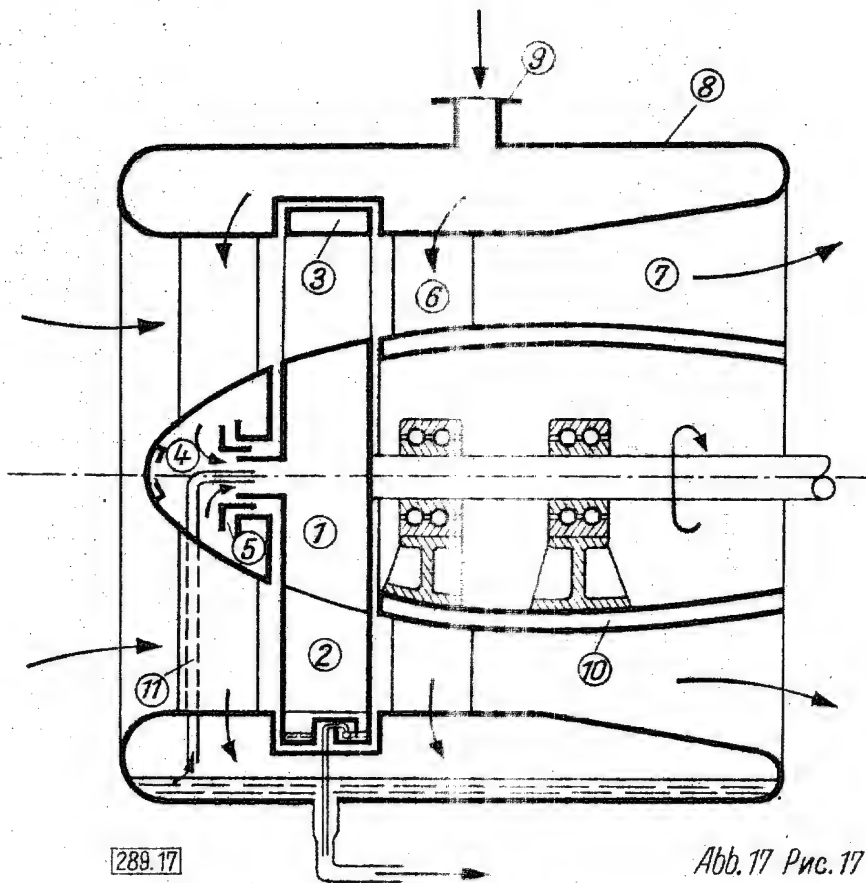
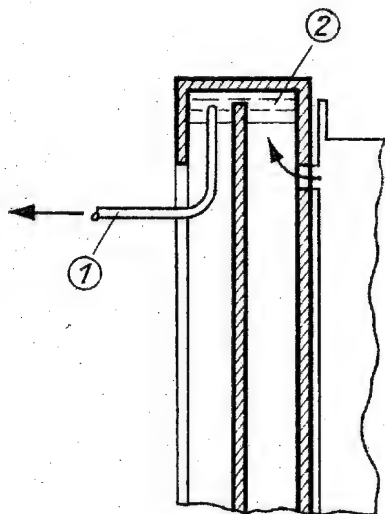
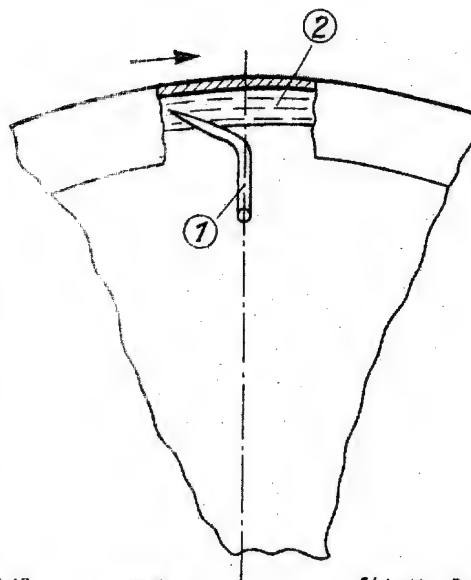


Abb. 17 Рис. 17



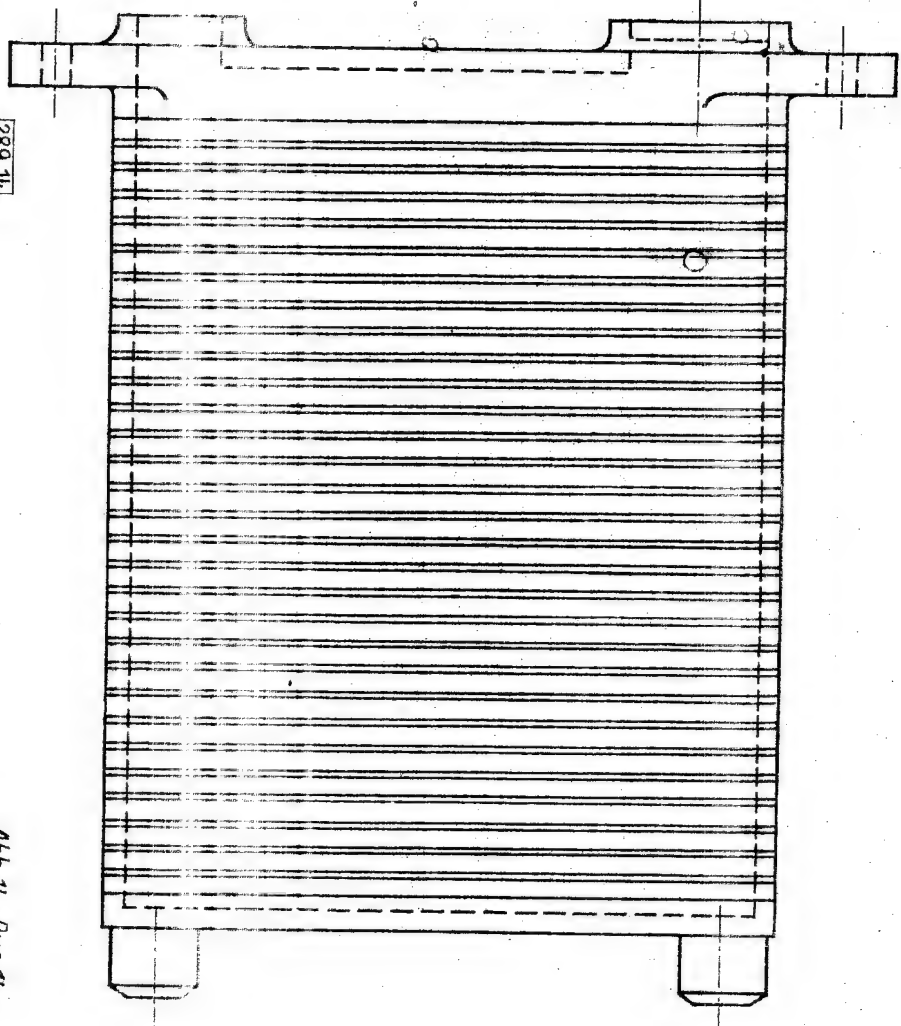
289.18

Abb. 18 Рис. 18



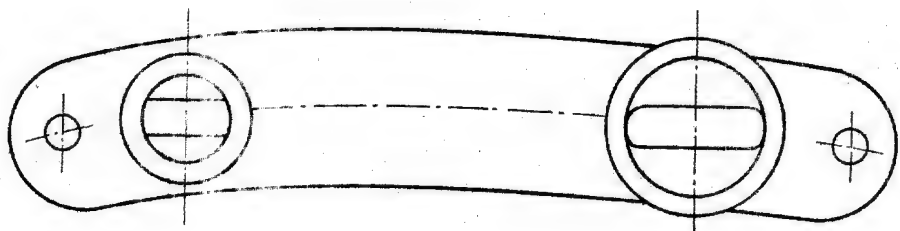
289.19

Abb. 19 Рис. 19



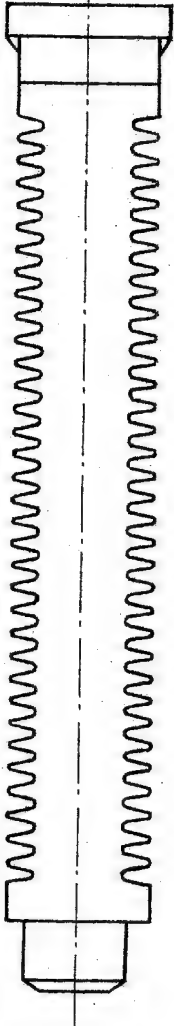
289.14

Abb. 14 Pnc. 14



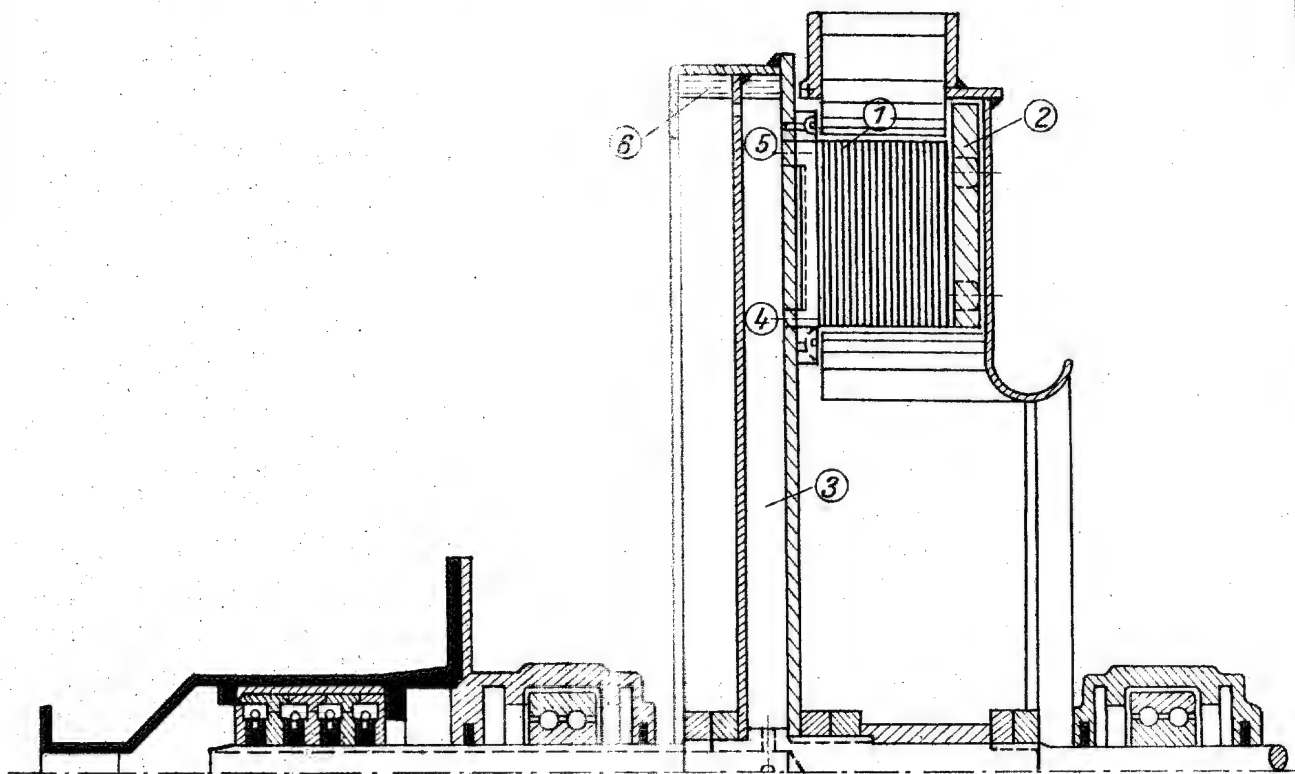
289.15

Abb. 15 Pnc. 15



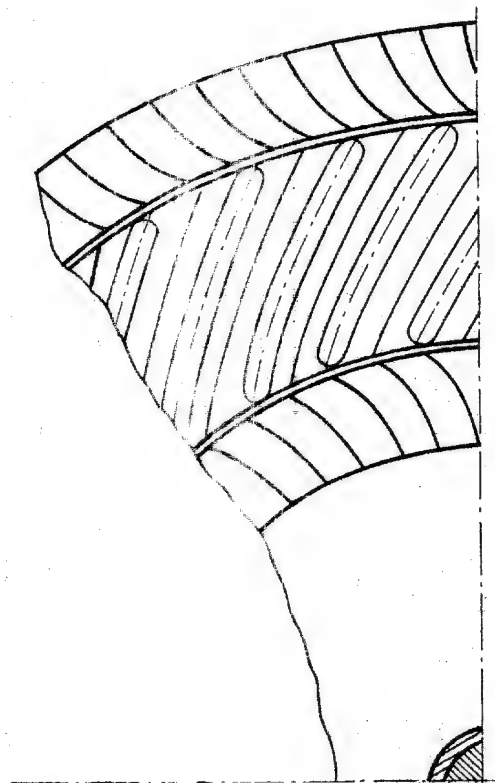
289.16

Abb. 16 Pnc. 16



289.12

Abb. 12 Рис. 12



289.13

Abb. 13 Рис. 13

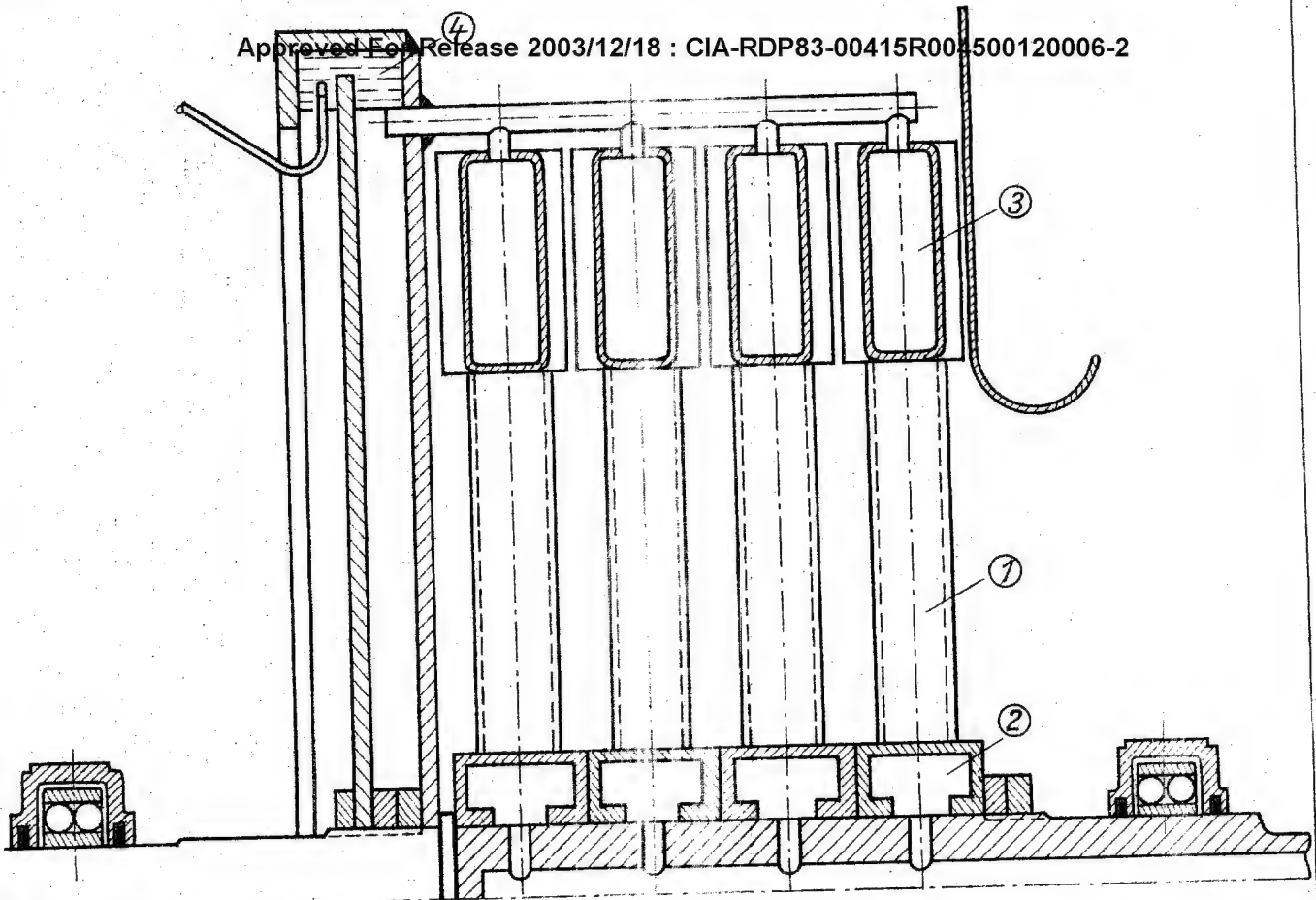


Abb. 10 Рис. 10

289.10

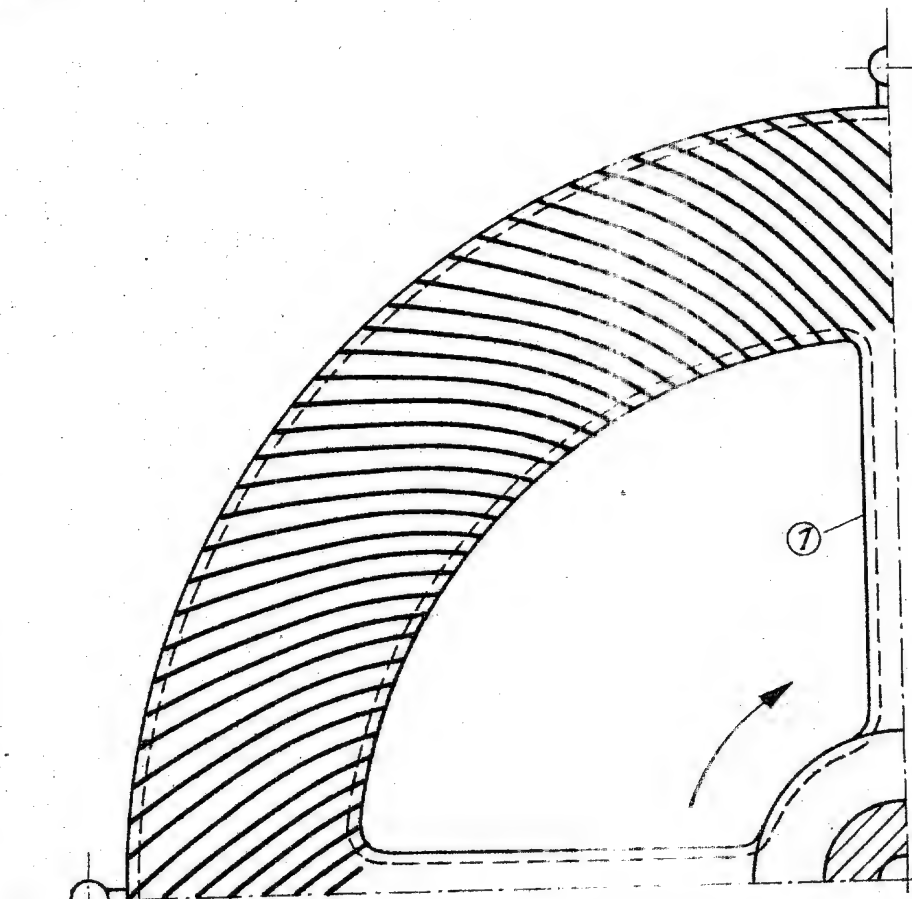


Abb. 11 Рис. 11

289.11

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

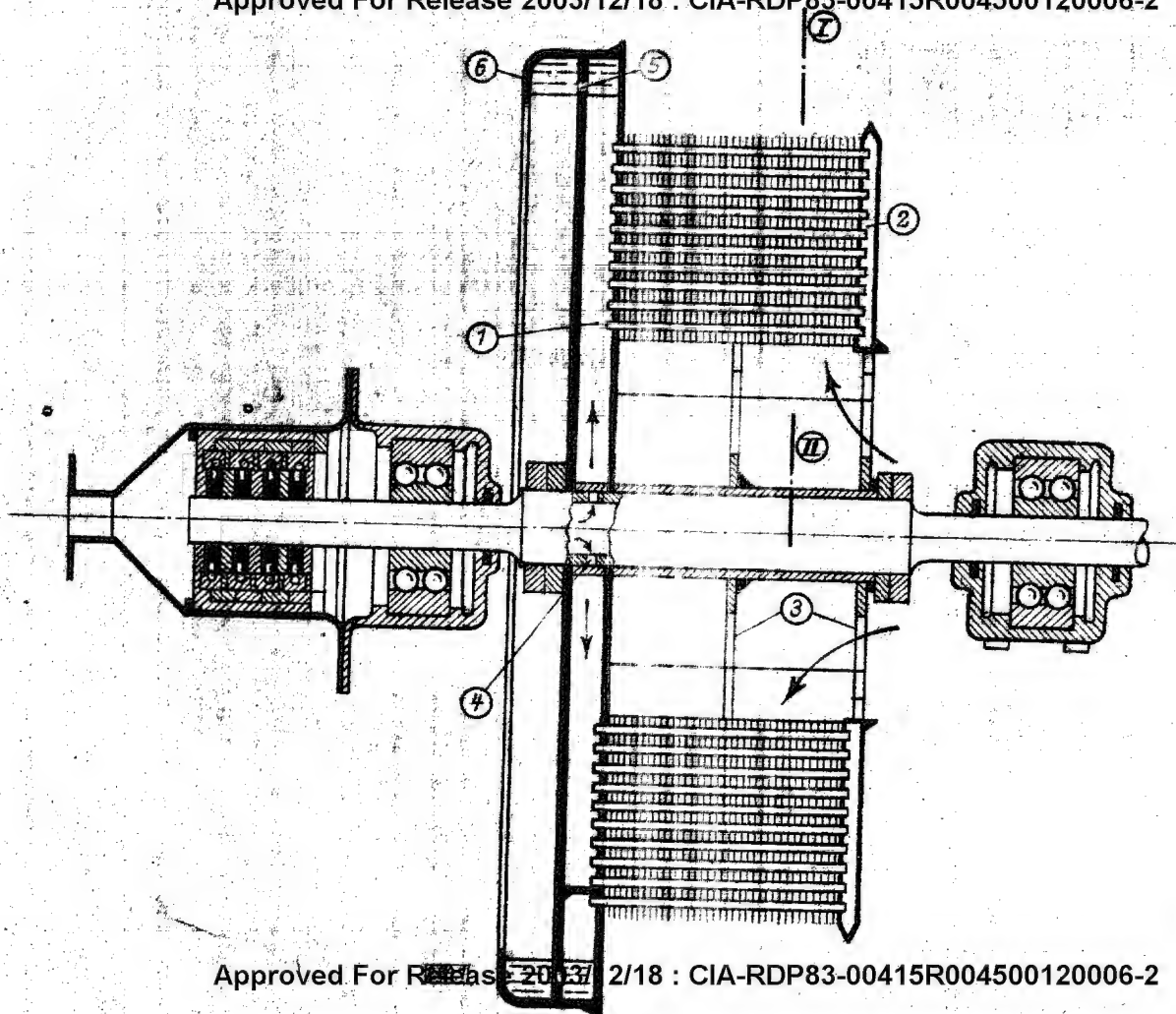


Abb.7  
Рис.7

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



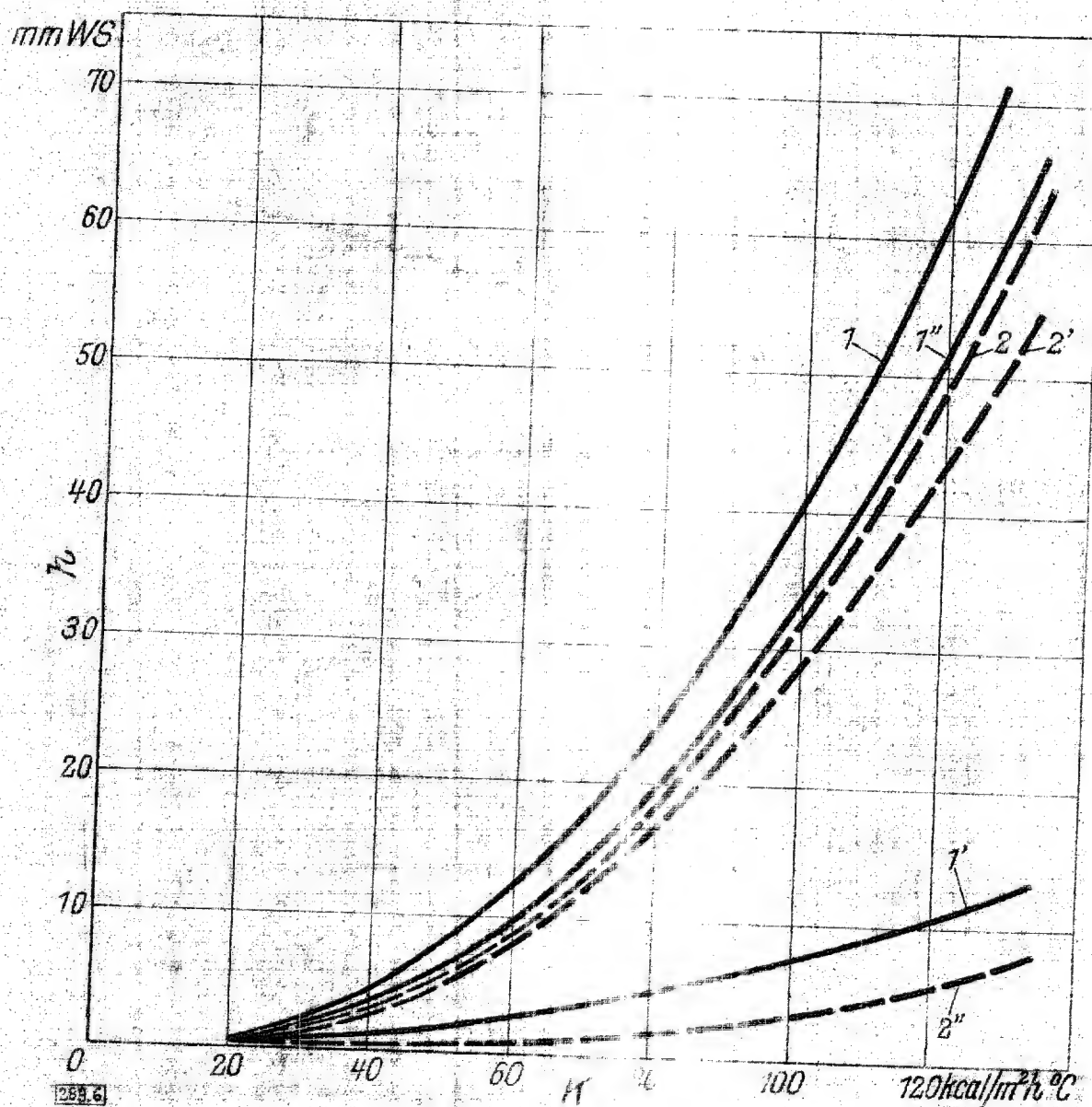


Рис. 6

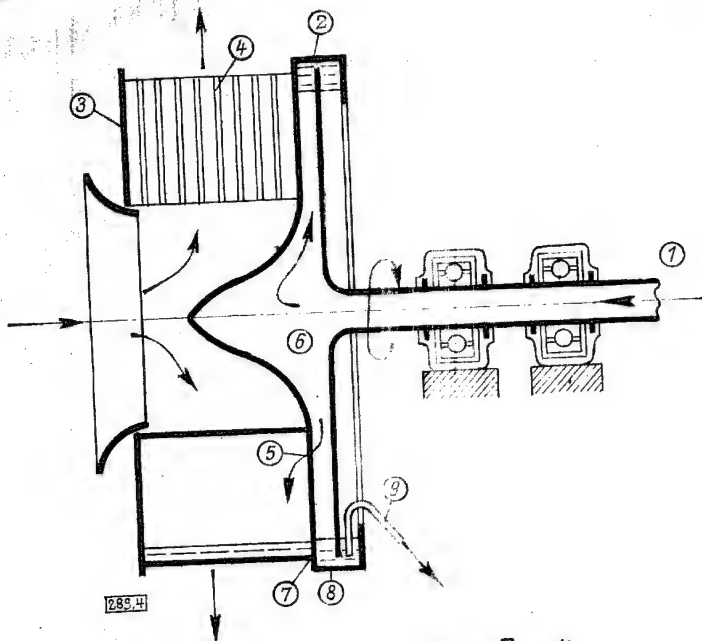


Abb. 4 Рис. 4

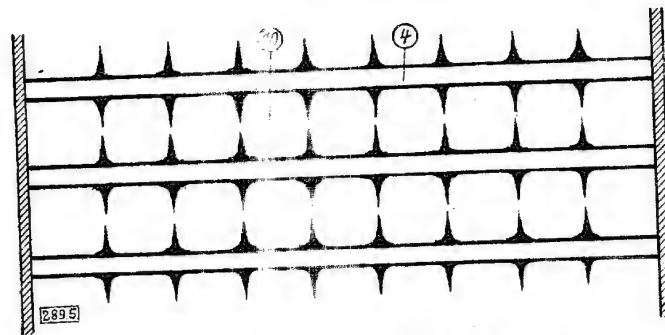


Abb. 5 Рис. 5

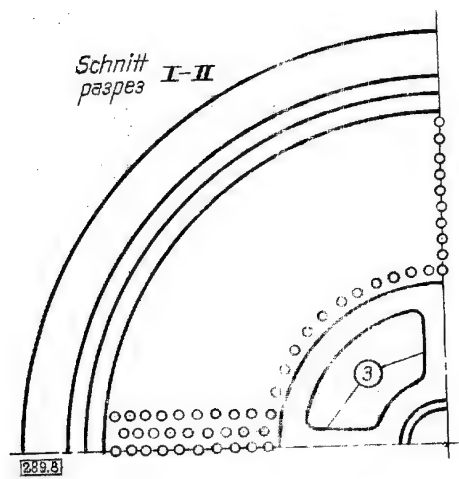


Abb. 8 Рис. 8

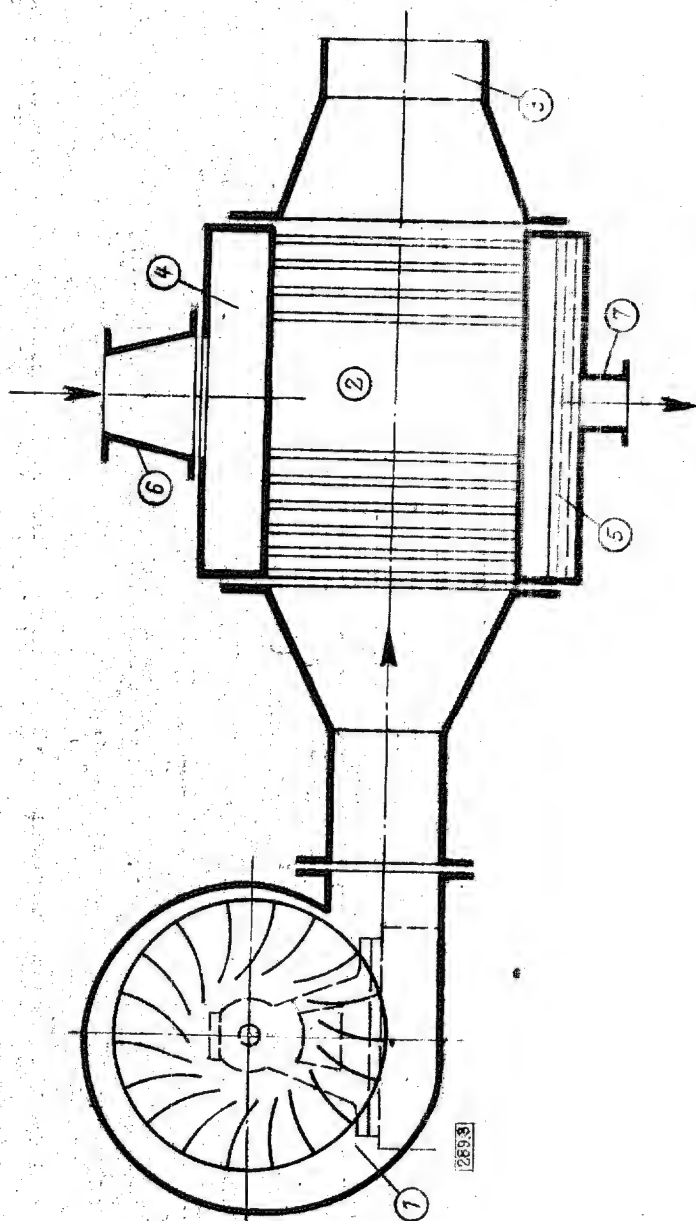


Abb. 3 РИС. 3

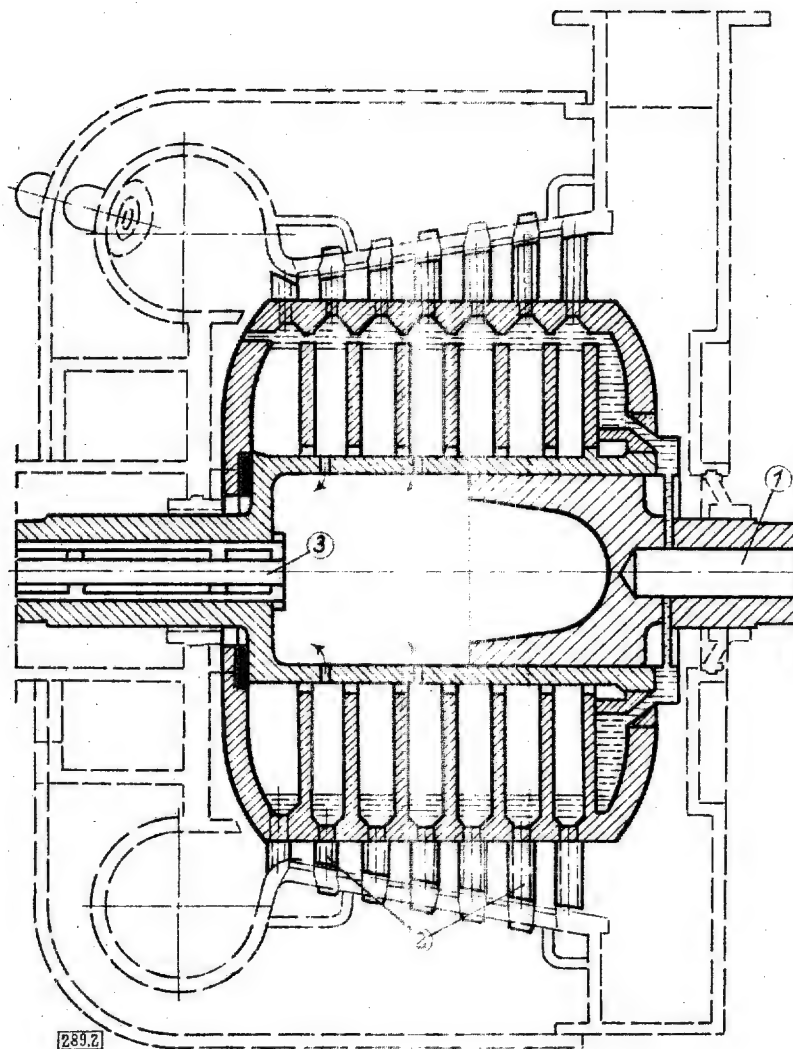


Abb.2 Рис.2

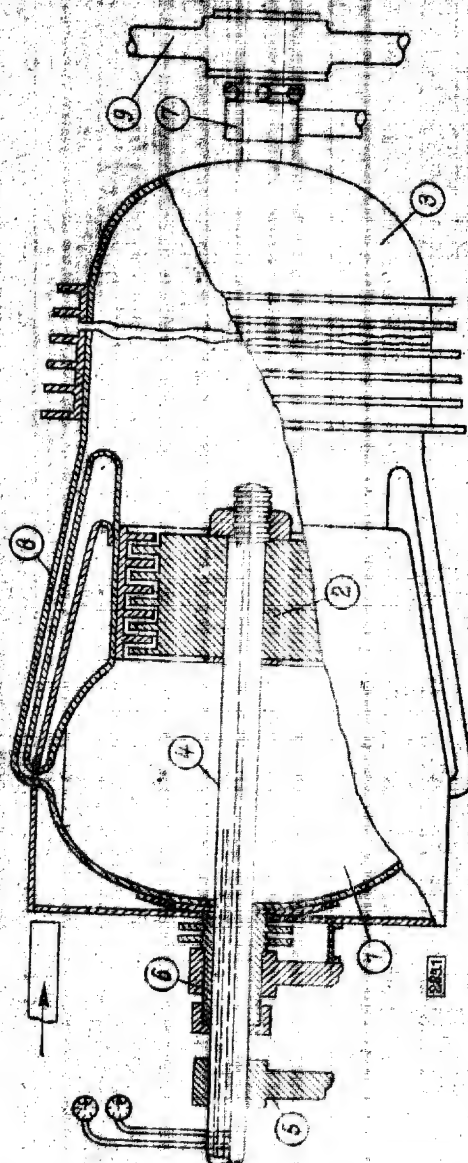


Abb.1 Рис.1

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2

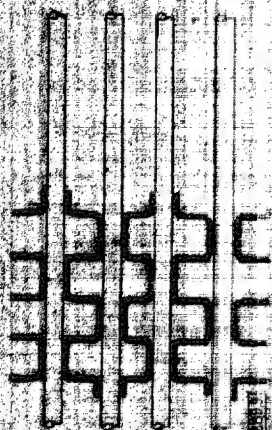


Abb. 9 Pnc. 9

Approved For Release 2003/12/18 : CIA-RDP83-00415R004500120006-2



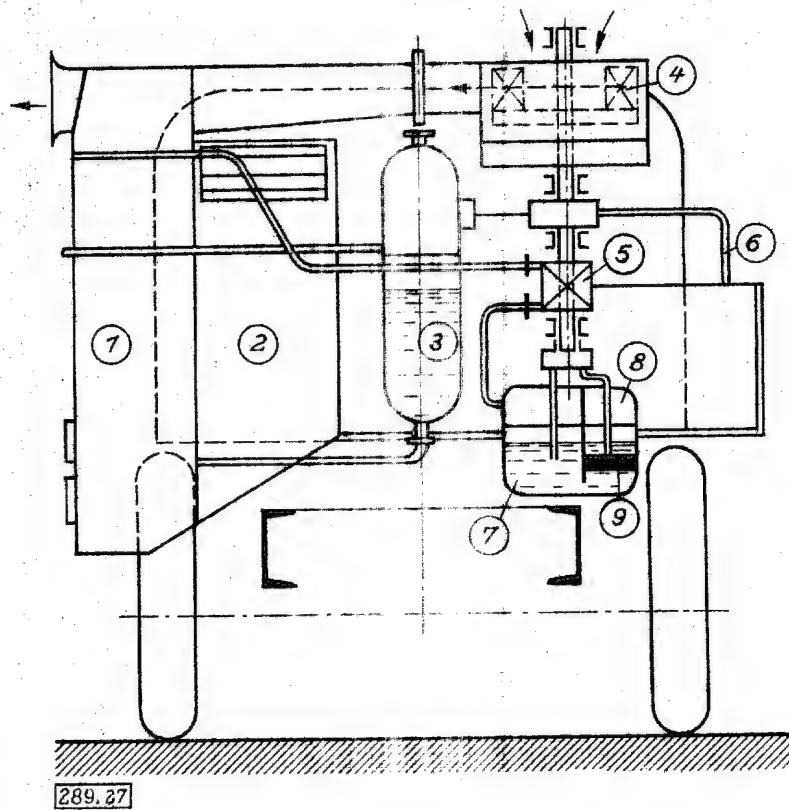


Abb.27 Рис.27

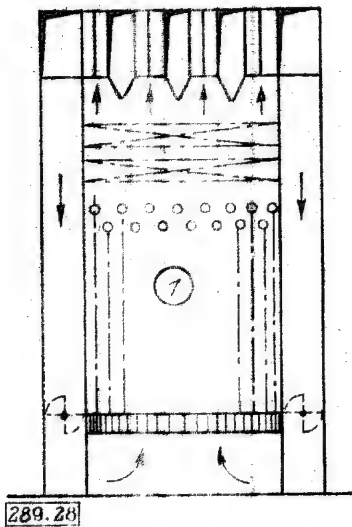


Abb.28 Рис.28

d)	Die Entkohlung der Stahloberfläche	19
e)	Die Kalthärtung der Oberfläche durch Bearbeitung	19
f)	Fehlstellen in der Oberfläche	21
III.	Anforderungen des Motorbaues und -betriebes an die Oberfläche	21
1.	Die Härte, Zähigkeit, Form und Glättung	22
2.	Die Bearbeitbarkeit	24
3.	Die Lagerreibung	24
a)	Der Gefügebau der Lagermetalle	24
b)	Ölfilm, Grenzreibung, Verschleissreibung	26
4.	Der Verschleiss	27
5.	Die Korrosion	29
6.	Temperaturwirkungen	29
a)	Abkühlung	29
b)	Erhitzung	31
B.	<u>Spezieller Teil:</u>	32
I.	Stahl	32
1.	Der Gefügebau	32
a)	Nichtgehärteter Kohlenstoffstahl	32
b)	Gehärteter oder vergüteter Kohlenstoffstahl	32
c)	Sonderstahl	33
2.	Die Korrosion der Stahloberflächen	33
a)	Die Passivität des Eisens	34
b)	Korrosion in der Wärme, Warmfestigkeit	35
c)	Schutzüberzüge	36
3.	Die Seigerung des Stahles	37
4.	Schlackeneinschlüsse	39
5.	Die Bearbeitbarkeit	40
II.	Grauguss	41
1.	Der Gefügebau	41
2.	Gusshaut, Randschicht, Hauptschicht	42
3.	Die Gleiteigenschaften	43
4.	Die Bearbeitbarkeit	44
5.	Der Verschleiss	45
6.	Die Korrosion	45
III.	Leichtmetalle	46
1.	Aluminiumlegierungen	46
a)	Der Gefügebau	46
b)	Die Korrosion	48

c) Der Verschleiss	49
d) Die Reibeigenschaften	49
e) Die Bearbeitbarkeit	49
2. Magnesiumlegierungen	50
a) Der Gefügebau	50
b) Magnesium kristallisiert hexagonal	51
c) Das spezifische Gewicht	51
d) Die Bearbeitbarkeit	52
e) Die thermischen Eigenschaften	52
f) Die Reibeigenschaften	54
IV. Bronze, Messing und Rotguss	54
V. Lagermetalle	55
1. Der Gefügebau	55
a) Weissmetalle	55
b) Zinnbronze und Rotguss	56
c) Bleibronze	56
d) Sintermetalle	57
2. Die Reibeigenschaften	57
Zahlentafeln 1 und 2	60
Schrifttum	63
Abbildungsüberschriften	67

## A. Allgemeiner Teil.

### I. Der Begriff der Oberfläche

#### 1. Begrenzung des Themas

In diesem Bericht wird unter "Oberfläche" die Grenzfläche der Werkstoffe verstanden, wie sie sich bei der Herstellung und der Verarbeitung des Konstruktionsmetalles ergibt, ohne Aufbringung eines anderen Werkstoffes und ohne absichtliche chemische oder physikalische Veränderung. Die Verzinkung, Verzinnung, Verchromung, Veraluminierung, Phosphatierung und dergl., die Härtung, Vergütung, Stützshärtung oder Kaltstreckung, also alle künstlichen Oberflächenschichten, werden nicht behandelt.

#### 2. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Oberfläche

##### a. Die Richtungen der Atomkräfte

Die Atome der (festen und flüssigen) Körper binden sich gegenseitig durch Anziehungs- und Abstossungskräfte auf einen bestimmten mit der Temperatur veränderlichen Abstand. Die Kräfte der Nachbaratome wirken aus allen Richtungen auf jedes Atom. Die Atome der äussersten Atomschichten an der Oberfläche werden jedoch nur von den im Innern der Körper liegenden Atomen angezogen. Von sie nach innen wirkenden Kräften halten keine nach aussen wirkenden Atomkräfte das Gleichgewicht, daher stehen die Atome der Oberflächenschicht unter einer nach innen gerichteten Zug.

##### b. Die Oberflächenspannung und Oberflächenenergie

Alle diese nach innen gerichteten Kräfte, mit Ausnahme der zur Oberfläche senkrechten winkelrechten, haben Komponenten in den Richtungen der Oberfläche. In der Oberfläche wirken also Kräfte wie in einer gespannten Membran. Man bezeichnet deren Gesamtheit als

Oberflächenspannung. Es besteht jedoch ein Unterschied gegenüber der Wirkung einer Membran. Je mehr eine Membran gedehnt wird, desto größer wird ihre Spannung. Eine Flüssigkeitsoberfläche dagegen, und ebenso die Oberfläche der festen Körper, hat konstante Spannung, einerlei, ob sie vergrößert oder verkleinert wird. Den Betrag der Spannung, bezogen auf die Längeneinheit eines Oberflächenschnittes, bezeichnet man mit  $\gamma$ . Der Wert  $\gamma$  ist, wenn die Flüssigkeit oder der feste Körper an ihre Dampfphase grenzen, eine vom Werkstoff abhängige (spezifische) Konstante. Um die Oberfläche, entgegen der Wirkung der Oberflächenspannung, zu vergrößern, muss Arbeit geleistet werden. Wird sie verkleinert, so wird Arbeit frei. Die Arbeit, die erforderlich ist, um eine zusätzliche Flächeneinheit der Oberfläche zu erzeugen, ist numerisch gleich  $\gamma$ . Sie wird als Oberflächenenergie bezeichnet.

c. Der Zustand der Oberflächenatome.

Infolge dieser besonderen Energieverhältnisse an der Oberfläche müssen alle physikalisch-chemischen Vorgänge an der Oberfläche anders verlaufen als im Inneren eines Metalles. Man kann dies auch anschaulich beschreiben. Da das geordnete Atomgitter nur unter der Einwirkung der nach allen Richtungen symmetrisch verteilten Kräfte entstehen kann, befinden sich die Atome an der Oberfläche in verzerrter Anordnung. Der Zustand der Oberflächenatome ähnelt sich demnach der Amorphie. Infolgedessen ist ihr chemisches und physikalisches Verhalten anders als im Inneren des Metalles. Sie sind chemisch leichter angreifbar. In physikalischer Hinsicht zeigen sie ein anderes mechanisches Verhalten als die Binnen-Atome im Inneren. Da nämlich die Oberflächenatome eine verzerrte Anordnung haben, können sie bei Beanspruchung durch äussere Kräfte keine Gleitschichten bilden, sondern jedes Atom muss der Spannung einzeln Widerstand leisten. Dabei wird bei einigen dieser Atome die Anordnung, ohnehin schon so verzerrt sein,



- 3 -

dass sie an der Grenze der Kohäsion liegt. Bei solchen Atomen kann schon eine geringe äussere Kraft die Trennung des Atommassenhanges bewirken.

d. Die Dicke der Oberflächenschicht im physikalisch-chemischen Sinne.

Die geschilderte physikalisch-chemische Besonderheit ist an der Oberfläche nur so weit vorhanden, wie die Atomanordnung verzerrt ist. Das ist nur bei einer verhältnismässig geringen Anzahl von Atomschichten der Fall. Weiter nach innen zu tritt alsbald das regelmässige oder nur gering verzerrte Gitter auf. Dies bedeutet eine Dicke der Oberflächenschicht in der Grössenordnung von schätzungsweise etwa  $20 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ). Die Dicke der Oberfläche im physikalisch-chemischen Sinne ist also sehr gering.

3. Der technische Begriff der Oberfläche und die technologische Bedeutung der physikalisch-chemischen Oberflächeneigenschaften.

In der Technik ~~ist~~ definiert man die Oberfläche auf Grund ihrer technologischen Verschiedenheit vom Inneren der Körper. Diese Verschiedenheit betrifft eine Oberflächenschicht mit einer Grössenordnung von etwa 1 mm, wie die folgenden Beispiele zeigen. Auf unbearbeiteten, gewalzten oder geschmiedeten Stahl ist die entkohlte weisse Oberflächenschicht etwa 0,1 bis 0,2 mm tief. Die Schicht von Grauguss ist etwa 0,2 bis 0,5 mm dick. Die Hörtiefe bei einseitig gehärtetem Stahl beträgt etwa 0,2 bis 2 mm. Die Kalthärtung durch spanabhebende Bearbeitung kann etwa 0,2 mm bis 2 mm tief eindringen. Man versteht also technisch unter dem Begriff Oberfläche eine Schicht von etwa 0,1 bis 2 mm Dicke. Die Begriffe der physikalisch-chemischen Oberfläche und der technischen Oberfläche sind daher völlig verschieden, weil die darunter vorgestellten Abmessungen um viele Grössenordnungen voneinander abweichen. Man könnte meinen, dass die physikalisch-chemische



- 4 -

Oberfläche mit ihren Besonderheiten den Techniker nicht interessiert. Diese Auffassung mag vor einigen Jahrzehnten berechtigt gewesen sein, heute wäre sie bei den erhöhten Anforderungen, die jetzt an den Werkstoff gestellt werden, ein verhängnisvoller Irrtum. Es hat sich gezeigt, dass auch die Vorgänge in der physikalisch-chemischen Oberfläche für die Technik Bedeutung haben. Dies lasse an drei Beispielen gezeigt werden.

#### a. Die Reiboxydation nach Fink

In den Jahren 1929/30 sind bemerkenswerte Untersuchungen von E. Fink [1] und von H. Fink [2] und E. Heermann [3,4] über die sogenannte Reiboxydation veröffentlicht worden. Die Reiboxydation als Oberflächenvorgang wird im Motorenbetrieb an manchen Konstruktionsteilen eintreten. Die Finkschen Feststellungen haben aber bisher nicht die Beachtung gefunden, die ihnen offenbar zukommt.

Fink untersuchte den Vorgang der Reibbeanspruchung. Er liess Stahlrollen bei normalen Anpressdruck und normaler Umlaufzahl trocken mit einem Schlupf von ca. 1% aufeinander laufen und untersuchte den dabei entstehenden feinpulvrigen, dunklen Abrieb. Die chemische und röntgenographische Analyse ergab, dass der Abrieb zum grossen Teil aus Eisenoxiden bestand. Der Versuch wurde dann unter Ausschluss der atmosphärischen Luft wiederholt, indem die Rollen in einer Gaskammer unter Wasserstoff oder Stickstoff aufeinander liefen. Jetzt war der Abrieb wesentlich geringer und bestand aus Flittern metallischen Eisens. Entsprechende Versuche wurden mit Rollen aus Elektrolytkupfer und aus Nickel ausgeführt. Auch diese Metalle bildeten bei Reibung in Luft Oxide, während der Abrieb bei Ausschluss der Luft metallisch war. Eisen, Kupfer und Nickel oxydieren bekanntlich in trockener Luft erst bei Erhitzung auf einige 100°. Fink schaltete jede wässrige Feuchtigkeit und jede Erhitzung aus, indem er die Reibversuche auch in flüssiger Luft ausführte. Auch dann bildeten sich

- 5 -

die Metalloxyde.

Diese Beobachtungen führten zu einer neuen weittragenden Theorie. Nach der früheren Auffassung hängt die Geschwindigkeit der Chemischen Reaktionen in wesentlichen von der Temperatur ab. Fink stellte die Theorie auf, dass auch die mechanische Spannung fester Körper ihre chemische Reaktionsfähigkeit beeinflusse. Die Reibung an der Oberfläche der Körper, also die dynamische Verzerrung der Atomordnung an der Oberfläche, erhöhe ebenfalls die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion. Diese Theorie der Reiboxydation ist in den angeführten Veröffentlichungen ausführlich erörtert und begründet worden und hat bisher keine Widerlegung gefunden. Sie wurde durch Versuche von H.J. Wiester<sup>15</sup> bestätigt, der feststellte, dass sich beim Polieren von Stahl in der äussersten Oberfläche Nitrid durch eine chemische Reaktion des Eisens mit dem Luftstickstoff bildet.

Der Vorgang der Reiboxydation umfasst aber mehr, als der Name besagt. zufolge der Fink'schen Theorie verursacht jede dynamische Verzerrung der Atomordnung eine Erhöhung der chemischen Aktivität. Solche Verzerrung der Atomlage kann auch ohne Reibung geschehen. Wenn ein Stab auf Wechselbiegung beansprucht wird, z.B. in der Schenk'schen Dauerprüfmaschine, so wird an einzelnen ungünstig gelegenen oder vorgespannten Oberflächenatomen eine dynamische Zerrung vor sich gehen, vielleicht sogar bei allen Atomen, deren Lage durch Oberflächenspannung schon verzerrt ist. Dann muss eine Oxydation unter Wirkung der Atmosphäre eintreten, auch ohne dass diese Stellen gerieben werden. Man kann also ganz allgemein bei allen unter beträchtlicher Spannung betriebenen Motorteilen die "Reiboxydation" erwarten. Fink und Hofmann zeigten, dass die Reiboxydation auch an ölgeschmierten Zahnrädern auftritt. Im Öl ist immer Luftsauerstoff gelöst. Die Bedingungen für die Oxydbildung an den geölten Reibstellen sind somit gegeben. Der dem Öl mitunter zugesetzte Graphit bildet eine nicht anhaftende Schicht auf dem Stahl und mag dadurch

- 6 -

die Oxydation behindern. Nach Fink und Hofmann wirkt die Reiboxydation auch bei der Bildung von Dauerbrüchen mit; infolge der Reibung auf der Spaltfläche sind die Bedingungen für die Oxydation <sup>dort</sup> gegeben. Die englischen Forscher B.P. Haigh und B. Jones <sup>67</sup> hatten bereits gezeigt, dass dem Sauerstoff bei der Dauerprüfung von Blei ein wesentlicher Einfluss zukommt.

Die Fink'schen Feststellungen haben bisher in der Praxis nicht zu entsprechenden Konstruktionsänderungen oder Vorbeugungsmaßnahmen geführt. Vielleicht gibt es einen gangbaren Weg, die Reiboxydation zu hindern und dadurch den Verschleiss zu verringern und die Haltbarkeit zu erhöhen.

b. Die Dauerhaltbarkeit von Metallen nach Siebel und Stähli

Dass die Zerstörung bei Dauerbeanspruchung von der äussersten Oberfläche ausgeht, haben neuerdings Siebel und Stähli <sup>67</sup> in einer für die Kenntnis der Wechselbeanspruchung grundlegenden Untersuchung nachgewiesen. Sie prüften gekerbte Rundstähle aus Stahl mit der Schenk'schen Dauerprüfmaschine und ermittelten die Wöhler-Kurven und die Schadenslinien. Zur Feststellung der Schädigung wandten sie dabei die Zugkerbschlagprobe an. Sie bestätigten die schon von anderen Forschern mitgeteilten Beobachtungen, dass bei geringer Lastspielzahl zunächst eine Verbesserung, eine "Hochtrainierung" des Werkstoffes vor sich geht, und dass die Schadenslinie bei etwa 60 bis 80 % der Gesamtlastspielzahl nach der Wöhler-Kurve liegt. Sie ist gewissermassen ein in Richtung auf kleinere Abszissenwerte verschobenes Abbild der Wöhler-Kurve. Der grundlegende neue Versuch, den Siebel und Stähli anstellten, bestand darin, dass sie die äusserste Oberfläche der Versuchsstäbe nach Erreichung der Schadensliste mit der Dauerprüfmaschine vor dem Zuschlagversuch durch Abdrehen von Bruchteilen eines Millimeters entfernten. Jetzt hatte die Probe die volle

- 7 -

Zuschlagfestigkeit eines hochtrainierten Stabes. Eine Schädigung war also nicht feststellbar. Siebel und Stahl entfernten nur an Probestäben nach Erreichung der Service-Linie die Oberfläche und setzten dann die Dauerprüfung fort. Nun wurde die Wöhler-Kurve beträchtlich überschritten. Die "Dauerhaltbarkeit" des Stabes war also viel höher als die "Dauerfestigkeit" nach der Wöhler-Kurve. Wenn die Oberfläche eines Stabes auf diese Weise nur während eines Gesamtversuches abgearbeitet wurde, so konnten Lastspielzahlen erreicht werden, die um 10 % höher waren als diejenigen der Wöhler-Kurve. Durch diese Versuche ist nachgewiesen worden, dass die Gefügung der Werkstoffe bei wechselbeanspruchung nur auf nur an der äussersten Oberfläche auftritt und sich von hier aus durch Riss- und Dauerbruchbildung, fortpflanzt. Der Stahl selbst (seiner ganze Masse mit Ausnahme der äussersten Oberfläche) wird bei der Langzeitbeanspruchung von den praktisch angewendeten Spannungen nicht verändert, sondern sogar etwas verfestigt. Siebel und Stahl haben dabei untersucht, um wieviel nun die Oberfläche zur Beseitigung der Schädigung abarbeiten muss. Dieses hat zeigte sich als abhängig von der Lastspielzahl nach der Wöhler-Kurve. Bei etwa 20 % der Gesamt-Wöhler-Zahl genügt ein Abarbeiten der Oberfläche um nur 0,01 mm! Man könnte dies praktisch fast beliebig oft ausführen, ohne den Querschnitt dieses Konstruktionsstückes merklich zu schwächen. Ein Dauerbruch war durch solches Verfahren vermieden werden können, selbst wenn die Beanspruchung von Stahl bei Dauerbiegung bei etwa 80 % der Streckgrenze läge.

c. Die äusseren Oberflächenschichten nach Ecker.

Bemerkenswerte Feststellungen über die Natur polierter und in Agorn behandelte Oberflächen hat R. Ecker mitgeteilt. Er polierte eben auf einer feingekörnten Glasplatte von Hart- oder weiches Poliergülden die eigenen Abriebe ab und brachte dann die Oberfläche mit Elektronenbeugungsgeschossen. Das Hauptresultat war ein aussergewöhnliches Beugungsdiagramm. Man beobachtete



- 8 -

amorphes Streubild entstand, als er eine kristalline Folie abtütete, kurzzeitig über einer Flamme erhitze und abschreckte. Nach diesen Beobachtungen gewinnt die alte Vorstellung von Fellby stark an Wahrscheinlichkeit, dass beim Polieren durch rasche Abkühlung kleinster kurzzeitig aufgeschmolzener Bereiche eine amorphe Oberflächenschicht entsteht. Glocker untersuchte dann die Oberflächen von Lagerschalen aus Nickel, Zinn, Weissmetall und Rossmetall. Auch hier konnten nach der Beanspruchung in ölgeschmierten Lagern amorphe Oberflächenschichten nachgewiesen werden. Diese Beobachtungen mit ihrer Deutung zeigen, wie grundverschieden die Betrachtungsweise bei der physikalisch-chemischen Oberfläche von der Beurteilung einer technischen Oberfläche ist. Wenn eine technische Oberfläche, z.B. aus Nickel mit einer Schichtdicke in der Grössenordnung 1 mm, aufschmilzt, so würde die ganze Lagerschale stark erwärmt werden, und man würde mit blossen Auge eine Feuererscheinung wahrnehmen. Die physikalisch-chemische Oberfläche im Lager ist aber nur einige Atomschichten dick. Sie kann sehr kurzzeitig in einem kleinen Bruchteil einer Sekunde unter der Wirkung der Reibungswärme aufschmelzen und infolge der Wärmeableitung ins Lager sofort wieder erstarren, ohne dass eine Lichterscheinung sichtbar wird, so ohne dass das Lager fühlbar warm wird. Die Abschreckung der entstehenden wenige Atomschichten tiefen Schmelzschicht ist denkbar schroff, da sie das darunter liegende kalte Metall benetzt und die abzuführende Wärmemenge sehr klein ist. Es ist dies der einzige bisher bekannte Fall, dass Metall bei sehr schroffer Abschreckung nicht Kristallinisch, sondern amorph erstarren. Die sehr dünne, fast nur zweidimensionale Schicht kann trotz ihrer kleinen Abmessungen technische Bedeutung haben. Sie muss sich hinsichtlich Korrosion und bei der Bindung des Epilamens, der aus absorbierten fremden Atomen bestehenden sog. äusseren Grenzschiicht (siehe auch den folgenden Absatz), anders verhalten als eine kristallisierte Oberfläche desselben Metalls.

- 9 -

#### 4. Die Adsorption an der Oberfläche.

Die Reibvorgänge und auch die Fink'sche Reiboxydation können erst richtig verstanden werden, wenn man eine besondere Wirkung der physikalisch-chemischen Oberfläche in Betracht zieht, nämlich die "Adsorption". Die Anziehungskräfte der Oberflächenatome sind, wie im Abschnitt "Die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Oberfläche" beschrieben, nur seitlich und nach innen an Nachbaratome gebunden, nach aussen sind sie frei. Nach aussen wirken also ein physikalisch-chemisches Kraftfeld im Atombereich der Oberfläche, d.h. in einer Entfernung von einigen Å - Einheiten. Sobald irgendwelche Gas- oder Flüssigkeits-Moleküle, in denen freie Energien geweckt werden können, in den Bereich dieses Kraftfeldes gelangen, werden sie gebunden. Dies geschieht praktisch immer, da stets die Atmosphäre oder Flüssigkeiten eine Oberfläche berühren. Man kennt nur zwei Ausnahmefälle, wo dies nicht der Fall ist:

1. Im Hochvakuum, 2. in geschlossenen Hohlräumen,

welche im Inneren der Metalle durch mechanische Zerreissung, z.B. beim Ziehen oder Walzen entstehen. Die Bindung von Fremdatomen an eine freie Oberfläche bezeichnet man als Adsorption. Die adsorbierte Schicht besteht nur aus einigen wenigen Atomschichten. Man bezeichnet sie als Epilamen. Sie wird auch Grenzschicht genannt, und zwar "äussere Grenzschicht", während die äussersten Atomschichten der Metalloberfläche die "innere Grenzschicht" bilden. Die Atome der äusseren und inneren Grenzschicht sind meist chemisch aneinander gebunden. Auf Eisen, Aluminium, Magnesium u.a. entstehen an der Luft Oxydschichten als Epilamen. Wenn solche Oxydschicht dicht ist, gewährt sie einen guten Korrosionsschutz (Abschnitt "Die Passivität des Eisens", Seite 36). Von besonderer technischer Bedeutung ist ferner das Epilamen, das die fettigen Schmiermittel auf den Lagermetallen bilden (vergl. später Abschnitt "Die Lagerreibung" S. 24 u.f.). Es haftet so fest und ist so innig mit der inneren Grenzschicht verbunden,



- 10 -

dass es durch kein Lösungsmittel abgewaschen werden kann. Will man es entfernen, so bleibt nur die Möglichkeit, es zugleich mit der inneren Grenzschicht mechanisch abzukratzen. Von dem Epilamen zu unterscheiden sind die als "Patina" bezeichneten Oberflächenschichten, wie sie sich z.B. auf Kupfer und Bronzen bilden. Die Dicke des Epilamens bemisst sich nach Å-Einheiten, es ist auch mikroskopisch nicht sichtbar. Eine Patina dagegen bildet eine Schicht von ca. 0,1 bis 1 µm Dicke. Sie ist eine festhaftende, dichte die Korrosion hemmende Kruste, welche durch chemische Reaktion des Metalles mit Luft und Wasser entsteht.

## • II. Die Metallkunde der Oberfläche

Die physikalisch-chemische Oberfläche ist nur ein vom menschlichen Geiste verallgemeinernd geschaffener Begriff. Auch seine Elemente sind Begriffe: Die Atome stellt man sich als Kraftpunkte vor, "Kraft" ist ein Kausalbegriff, die Kraft- und Energiewirkungen werden nach stereometrischen und algebraischen Gedankenregeln beurteilt. Diese Denkweise ist ähnlich unwirklich wie z.B. bei dem Begriff "Kristall". Durch die stereometrische Vorstellung der regelmässigen körperlichen Symmetrie wird eine Anschaulichkeit vorgetäuscht. Doch jede Wirklichkeit ist anders als das begriffliche Ideal. Es gibt keinen einzigen kristallisierten Körper, der sich nicht durch Schiefheiten, Fehlstellen, Ungleichmässigkeit, Unsymmetrie und Krümmungen von der ideellen Kristallvorstellung unterscheidet. So ist auch jede gegenständliche Körperoberfläche verschieden von dem gedanklich aus Kraftpunkten und räumlichen Kraftrichtungen zusammengestellten physikalisch-chemischen Oberflächenbegriff. Man muss also, um den Begriff der Oberfläche richtig anwenden zu können, die Beschaffenheit der Oberfläche auf Grund der Lehren der Metallkunde erkannt haben.

### 1. Die Homogenität und Heterogenität

Metalle, deren sämtliche Kristalle die gleiche chemische

- 11 -

Zusammensetzung haben, bezeichnet man als "h o m o g e n". Sie sind aus Elementen aufgebaut (z.B. Elektrolyteisen, Weichblei, Reinnickel u.a.) oder aus deren Mischkristallen (z.B. austenitischer Nickelstahl, *d*-Messing u.a.). Homogene metallische Werkstoffe, die nur aus einheitlichen chemischen Verbindungen bestehen, werden wegen ihrer Sprödigkeit nicht für Konstruktionsteile angewandt. Als h e t e r o g e n bezeichnet man Metalle, die ein Gemenge chemisch verschiedener Kristallarten sind. (Kohlenstoffstahl, die meisten Sonderstähle, Messing, Aluminium-Legierungen u.a.) Man fordert auch von den heterogenen Konstruktionsmetallen eine mechanische Gleichmässigkeit nach allen Richtungen, weil man nur dann ihre Festigkeit zuverlässig berechnen kann. Die heterogenen Bestandteile müssen also so gleichmässig verteilt und im Verhältnis zum beanspruchten Querschnitt so klein sein, dass die mechanischen Unterschiede sich ausgleichen (Quasiisotropie). Der Unterschied der Eigenschaften homogener und heterogener Metalle äussert sich immer in deren Oberfläche. Sie haben verschiedene Halb- und Korrosionseigenschaften.

a. Es gibt technisch kein homogenes Metall

Fast alle technisch angewandten Metalle enthalten Schlackeneinschlüsse oder andere heterogene Verunreinigungen. Die vollkommene Homogenität besteht nur als Begriff. In gegenständlicher Wirklichkeit gibt es kein ganz homogenes Metall. In allen aus Mischkristallen aufgebauten Metallen besteht fast immer Kristallsteigerung: die Korngrenzen sind höher legiert als das Innere der Körner. Jedes, auch ein sogenanntes reines Metall, enthält Spuren von Verunreinigungen. Diese werden bei der Erstarrung auf die Korngrenzen gedrängt. Löst man ein Metall in einem Lösungsmittel, das nur die Metallatome angreift, so bleibt stets ein hauchfeines Maschwerk übrig mit Maschen von der Gestalt der Metallkörner. Die "Homogenität" der Oberfläche ist also nur als ein sehr selten vorkommender Grenzfall

- 12 -

anzusehen, praktisch sind alle Oberflächen der Konstruktionsmetalle mehr oder weniger heterogen. Hinsichtlich des Korrosionsangriffs muss man deshalb mit örtlicher Heterogenität rechnen, bezüglich der Reibeigenschaften jedoch darf man die geringen unbeabsichtigten Fremdeinschlüsse als unerheblich vernachlässigen.

b. Übersicht über die Gefügebestandteile der Oberfläche einiger im Motorenbau angewandter Metalle

Die Heterogenität ist bei einigen metallischen Werkstoffen eine Folge der Erzeugungsart dieser Werkstoffe. Das Kupfer enthält infolge der Oxydation beim raffinierenden Schmelzen stets Kupferoxydul. Reinkupfer ist deshalb immer eine Legierung aus Kupfer und Kupferoxydul. Aller Stahl enthält Zementit, weil die Erzeugung eines kohlenstofffreien Eisens viel zu teuer ist. Im Aluminium findet sich stets Silizium als Gefügebestandteil, da die Herstellung völlig reinen Aluminiums zu teuer sein würde und ein entsprechendes Herstellungsverfahren auch nur mit grossen Schwierigkeiten praktisch durchzuführen wäre. Heterogenität ist jedoch kein Fehler, sondern erwünscht und notwendig zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Wenn es nicht auf besondere Eigenschaften, z.B. Biegezugfähigkeit, ankommt, so bewähren sich hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit diejenigen Metalle am besten, die aus einer zähen Grundmasse mit feinverteilten härteren Einlagerungen bestehen. Solchen Aufbau haben die Stähle, Bronzen und Leichtmetalle. Das Prinzip des Eisenbetons bzw. der benagelten Schuhsohle ist durchgängig angewandt. Die Schneide eines feingeschliffenen Stahlmessers wirkt als Säge; wenn man sie im Mikroskope betrachtet, sieht man, dass die regelmässig eingelagerten harten Karbide wie Sägespitzen in der Schneide hervortreten. Durch Walzen, Schmieden und Ziehen werden die harten Einlagerungen mechanisch zerkleinert und gleichmässig verteilt. Die Festigkeit und Härte der Werkstoffe werden fast um eine

- 18 -

Zehnerpotenz erhöht, wenn ihre harten Bestandteile durch Wärmebehandlung, besonders fein verteilt sind (vergüten, aushärten). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Bestandteile einiger im Motorenbau angewandter Metalle. Man hat erst neuerdings nach Einführung des Mikrohärteprüfers<sup>197</sup> begonnen, die Härte der Bestandteile zu bestimmen.

## 2. Wirkung der Form und Anordnung der Gefügebestandteile

### a. Die lamellare und kugelige Form

Die Form und Anordnung der Einlagerungen haben grosse Wirkung auf die Gesamthärte- und Festigkeit des Werkstoffes. Wenn in einem Haufen Lehm eine Anzahl von Eisenblechen eingeschoben ist, so ist der Haufe versteift. Mischt man zu aber dieselbe Eisenmenge in Form kleiner Kugeln bei, so wird seine Plastizität kaum gemindert. Entsprechend wird Stahl wesentlich härter und fester, wenn der Zementit in Form von Lamellen als Bestandteil des lamellaren (streifigen) Perlites eingelagert ist. Bei kugelliger Ausbildung des Zementites sind die Härte und die Festigkeit des Stahles um etwa 50% geringer. Damit harter Stahl wirtschaftlich und gleichmässig bearbeitbar wird, muss deshalb der Zementit in die kugelige Form übergeführt werden. Auch für die Härtung des Stahles soll der Zementit die Form kleiner gleichmässig verteilter Kügelchen haben. Entsprechendes gilt für alle harten Einlagerungen der Metalle. Liegt der Zementit als zusammenhängende Schicht auf den Korngrenzen, so ist der Stahl schlagempfindlich und nicht tiefziehbar. Für alle Metalle, insbesondere für Stahl und Aluminiumlegierungen, wird das Korrosionsverhalten dadurch beeinflusst, ob die heterogenen und deshalb elektrochemisch aktiven Bestandteile auf den Korngrenzen als Metalle oder als Körper<sup>20</sup> ausgeschieden sind.

### b. Die Korngrösse

Besondere technische Bedeutung hat die Korngrösse der Grundmasse. Die Bruchfläche eines Metalles bei der

- 14 -

Zerrei~~ß~~probe verläuft stets durch die Körner, nicht aber entlang der Korngrenzen. Die Korngrenzen sind also Orte höherer Zerrissfestigkeit, deshalb ist ein Metall desto fester, je mehr Korngrenzen es enthält, also je feinkörniger es ist. Anders verhalten sich die Metalle bei ruhender Dauerbelastung. Schon unterhalb der Spannung, bei der sich Gleitschichten im Korninneren bilden, beginnt unter dem Einfluss der Dauerlast ein Platzwechsel der Atome auf den Korngrenzen. Das Metall beginnt, der Spannung nachgebend, sich allmählich zu längen, zu "kriechen". Bei ruhender Dauerlast ist also das Korngrenzeng Gebiet mechanisch schwächer als das Korninnere. Deshalb sollen die auf Dauerlast beanspruchten Konstruktionsteile, und diese sind in der Mehrzahl, nicht zu feinkörnig sein. Jedoch verbietet sich ausgesprochene Grobkörnigkeit, weil dann die Schlagfestigkeit stark absinkt. Man sind gerade die ausgehärteten Vanadium-Stähle mit der grössten Dauerfestigkeit am feinkörnigsten. In diesen Falle liegen die feinverteilten Karbide auf den Korngrenzen und hindern dort das "Kriechen" des  $\alpha$ -Eisens.

#### c. Die Textur

In den verschiedenen Kristallrichtungen haben die einzelnen Kristalle verschiedene chemische Angreifbarkeit und verschiedene mechanische Eigenschaften. Auf dieser chemischen Differenzierung beruht die Sichtbarmachung des Gefügebildes durch Ätzung. Wie sehr die mechanischen Eigenschaften in den verschiedenen Kristallrichtungen voneinander abweichen können, lässt sich aus Beobachtungen an Graphit erkennen. Parallel zur hexagonalen Basisfläche gleiten die Graphitlamellen ausserordentlich leicht, sozusagen, ohne Widerstand, aufeinander ab. Deshalb gehört Graphit zu den weichsten Körpern. Seine Oberflächen liegen nach dem Schleifen und Polieren im Grauguss schon in der Schliffebene. Er schilfert ab und liegt vertieft. Aber in der Kristallrichtung winkelrecht zur Basisfläche sind die Kohlenstoffatome



- 12 -

des Graphites Blätter aneinander gebunden wie im Diamant. In dieser Richtung bilden sich keine Gleitschichten. Wenn Graphit in sphärolithischer Gestalt so kristallisiert ist, dass überall die Gleitsflächen tangential zur Sphärolithoberfläche liegen, so erweist er sich bei der Härteprüfung als ebenso hart wie Diamant.

Bei völliger regelloser Orientierung der Kristalle (sogenannter "statistisch gleichmässiger" Orientierung) gleichen sich die mechanischen Unterschiede für ihre Gesamtheit aus. Eine Metalloberfläche mit statistisch gleichmässiger Orientierung der Kristalle zeigt z.B. überall dieselbe Kugelhärte. Bei der Beurteilung eines einzelnen Oberflächenkristalles muss jedoch seine Orientierung beachtet werden. Man kann sie meist schon an der küsseren Form der Kristalle erkennen. Sobald die Orientierung der Kristalle nicht regellos, sondern gleichartig ist, (sogenannte "Gefügerichtung" oder "Textur"), sind die mechanischen Eigenschaften einer Oberfläche, je nach ihrer Richtung zu den Kristallen verschieden. Dies ist besonders für die Oberfläche der Gußstücke zu beachten, weil hier am häufigsten Texturen vorhanden sind.



- 16 -

An der Oberfläche von Metallstücken liegen meist alle Kristalle mit derselben Kristallachse in der Abkühlungsrichtung. Auch beim Walzen und Ziehen von Metallen verschieben sich die Kristalle zu gleichsinniger Orientierung. Diese "Walz- und Ziehtexturen" verursachen auch bei der Rekristallisation eine wiederum gemeinsame Orientierung ("Rekristallisationstextur"). Sogar durch die Bearbeitung kann nach den Untersuchungen von A.A. Shishakow und V.J. Kabanovkin [10] eine Textur entstehen. Diese beiden Forscher fertigten Elektronenbeugungsaufnahmen von einer Messingoberfläche, welche ohne bevorzugte Richtung geschliffen war, und fanden dann eine regellose Orientierung. Wurde jedoch die Oberfläche unter Benutzung definierter Richtungen geschliffen, so trat eine Regelung deutlich hervor. Im untersuchten Fall verlief die Orientierungsachse parallel der (110) - Richtung.

3. Die durch die Art der Herstellung der Konstruktionsteile  
Veranlassten Oberflächeneigenschaften

Die Texturen lassen sich durch röntgenographische Untersuchungen der Oberfläche, mitunter auch schon aus der metallographischen Beobachtung erkennen. Zu beachten ist aber, dass die Beschaffenheit, die die Metalle an der Oberfläche je nach der Art ihrer Erzeugung aufweisen, des Öfteren von Metallarten abweicht.

- 17 -

a. Die Gußhaut

Die Oberfläche von Gußstücken erfährt beim Gießen und bei der Erstarrung eine chemische Änderung unter Einwirkung der Luft und der Gußform. Das Grundmetall und einige Legierungsbestandteile werden oxydiert, andere Legierungsanteile werden vergast; ferner werden Gase und feste Partikelchen der Formauskleidung aufgenommen. Daher finden sich in einer Schicht von 0,1 bis ca. 1 mm Dicke Einlagerungen mannigfacher Oxyde je nach der Zusammensetzung der Schmelze, bei Eisenschmelzen: Eisenoxyduloxyd und Eisensilikate, bei Kupferlegierungen: Kupferoxydul, bei Aluminiumlegierungen: Aluminiumoxyd. Durch Vergasung verarmt z.B. Sonderstahl in der Oberfläche an Molybdän, während Messing und Rotguss an Zink verarmen. Aus der Gießform werden vornehmlich kleine Sandkörner, aber auch Graphitteilchen, Leampartikelchen und dergleichen aufgenommen, aus den Gasen der Gießform nimmt Grauguß Schwefel auf. Bei Grauguß kommt zu dieser chemischen Änderung noch eine Konstitutionelle Änderung der Gußhaut hinzu.<sup>[7]</sup> Die Eisen-Kohlenstofflegierungen erstarrten mitunter in der schnell abkühlenden Gußhaut nach dem metastabilen Zementitsystem, es tritt dort etwas Ledeburit auf, während das gesamte übrige Gußstück nach dem Graphitsystem grau erstarrt. Auch gewisse Aluminium-Mangan-Legierungen können in der Oberfläche metastabil erstarrten, so dass dort ein anderes Manganaluminid entsteht als im Inneren der Gußstücke.

b. Die Randschichten in Gußstücken

Die Korngrösse der Metalle hängt vom Temperaturgefälle bei der Erstarrung ab. Schnelle Erstarrung bewirkt ein feines, langsame ein grobes Korn. Die Beziehung ist nicht linear, sondern die Grösse der Körner nimmt bei Verlangsamung der Erstarrung wie nach einer Exponentialkurve sehr beträchtlich zu. Unter der Oberfläche nach innen zu

20 % ansteigen, der Phosphorgehalt in Stählen mit durchschnittlich 0,01 % P auf 0,1 % und mehr. Bei der "normalen" Blockseigerung finden sich die Anreicherungen der Nebenbestandteile im Inneren des Stückes, so in Stahl und in Grauguss, bei der "umgekehrten" Blockseigerung werden die Legierungsbestandteile in der Rinde angereichert, so bei Aluminiumlegierungen und einigen Kupferlegierungen. Die Seigerung wird im speziellen Teil des Berichtes unter "Stahl", Seite 38/39 eingehend beschrieben. Hier genüge der Hinweis, dass die Oberfläche der Konstruktionsteile infolge der Seigerungen sowohl in Guß- als auch in Schmiedestücken und gewalzten Werkstücken anders legiert sein kann als das Innere.

d. Die Entkohlung der Stahloberfläche

Beim Schmieden, Warmwalzen, Glühen und Härten von Stahl wird dessen Oberfläche durch die oxydierende Wirkung der Luft in einer Tiefe von etwa 0,1 bis 0,5 mm entkohlt. Diese Schicht wird von Konstruktionsteilen fast immer durch Bearbeitung entfernt (An sich würde sie die Festigkeit kaum beeinträchtigen; bei Dauerbeanspruchung in Zimmertemperatur würde sie infolge ihrer Weichheit sogar weniger als eine härtere Oberfläche zermürbt werden). Von praktischer Bedeutung ist die Oberflächenentkohlung bei Schneidwerkzeugen. Gerade die Schnittkante muss hart und ohne jede Spur einer weichen Haut sein. Man hat gelernt, durch Härten aus Salzbadern die Oberflächenentkohlung der Werkzeuge zu vermeiden und durch nitrierende Härtebäder gerade auf der Oberfläche eine besonders harte, feine Nitrierschicht zu erzeugen.

e. Die Kalthärtung der Oberfläche durch Bearbeitung

Die mechanische Kraft der spanabhebenden Werkzeuge ist in der Schnittfläche so gross, dass der bearbeitete Werkstoff dort abreißt. Er wird bei der Bearbeitung also plastisch verformt. Es ist klar, dass diese

- 18 -

entstehen geradezu Schichten mit plötzlich stark vergrößerter Kristallisation.

Auch die Orientierung der Kristalle ist in Gußstücken von aussen nach innen verschieden. Auf eine schmale gleichmässig orientierte Feinkornschicht der äussersten Rinde folgt nach innen zu meist eine breite Schicht von Stengelkristallen. In allen diesen liegt die gleiche Kristallachse ziemlich parallel mit der Abkühlungsrichtung (Einstrahlung, Transkristallisation, Gußgefügeregelung). Noch weiter innen, unterhalb der Stengelkristalle, befindet sich eine Grobkornmasse ohne Gefügeregelung. In grossen dickwandigen Gußstücken ist dergestalt der Gefügebau von Zentimeter zu Zentimeter verschieden, in kleinen dünnwandigen von Millimeter zu Millimeter. Bei Bearbeitung der Gußstücke werden diese Schichten angeschnitten und erscheinen in der bearbeiteten Oberfläche. Wenn die Rinde der Gußstücke nicht parallel zur Gußoberfläche, sondern schräg zu ihr abgearbeitet wird, wo enthält die bearbeitete Oberfläche Streifen mit verschiedenem Gefügebau und entsprechend verschiedener Festigkeit, insbesondere verschiedener Schlagfestigkeit.

c. Die Seigerung

Die im Abschnitt "Es gibt technisch kein homogenes Metall" S. 12 erwähnte Kristallseigerung geschieht innerhalb der einzelnen Kristalle als eine Entmischung mikroskopischen Ausmasses. Daneben vollzieht sich in vielen Legierungen die "Block- oder Gußstückseigerung", welche eine Entmischung der Legierung über Strecken von Zentimetern und Dezimetern bewirkt. Die Randschichten der Gußstücke erstarrten mit anderen Konzentrationen als der Kern.

Aus der homogenen Schmelze entstehen differente Legierungen, deren Gehalte bis zu 1000 % und mehr verschieden sein können, z.B. kann der Kupfergehalt in den Aluminiumlegierungen mit durchschnittlich 4 % Cu örtlich auf über

- 20 -

plastische Verformung nicht an der Bearbeitungsfläche halt macht, sondern auch in die Tiefe wirkt. Nach Versuchen von W. Rüttmann<sup>6a)</sup> ist eine Schicht von etwa 2 mm Dicke unter der Oberfläche infolge der spanabhebenden Bearbeitung kaltverformt. Infolge der Kaltreckung übt diese Schicht eine Heyn'sche Spannung aus. Seine Versuche wurden mit einem Chrom-Nickel-Stahl mit 9% Ni und 18 % Cr (Stahl I in Abb. 1) und mit einem zweiten Chrom-Nickel-Stahl mit 4,36 % Ni und 1,11 % Cr (Stahl II in Abb. 1) ausgeführt. Die inneren Spannungen, vgl. Abb. 1, sind überraschend gross. Die Eigenschaften der beiden Stähle gehen aus der Tabelle in der Unterschrift zu Abb. 8 hervor.

Diese Spannungen summieren sich mit der physikalisch-chemischen Oberflächenspannung. Der Querschnitt eines bearbeiteten Werkstückes steht also unter einer Dauereigenspannung auf Druck, deren Grösse von der Fläche des Querschnittes abhängt. Diese Druckvorspannung hat die Grössenordnung von etwa 1 bis 2 kg/mm<sup>2</sup>, darf also nicht vernachlässigt werden. Man hat sie bisher offenbar übersehen. Sie summiert sich z.B. bei Wechselbeanspruchung mit der äusseren Kraft, so dass unter Umständen die wirkliche Zugbeanspruchung um etwa 1 kg geringer, die Druckbeanspruchung aber um etwa 1 kg höher wird. Die Zerstörungen bei der Wechselbeanspruchung werden demnach auf der Druckseite zuerst einsetzen. Die Ordinatenwerte der Wöhler-Kurven müssen eine entsprechende Korrektur erfahren. Man darf von dieser Korrektur nur dann absehen, wenn ein Prüfstab nach der Bearbeitung zur Beseitigung der Heyn'schen Spannungen ausgeglüht worden ist. Bei röntgenographischer Untersuchung fanden H. Möller und A. Rott [13] etwas geringere Dicken der kaltverformten Schicht als Rüttmann. Nach ihren Beobachtungen betrug sie nach Schruppen und Bohren 0,5 bis 0,6 mm, nach

- 21 -

Schlichten, Schleifen und Läppen 0,2 bis 0,3 mm. Durch den Vershub wird die kalt verformte Schicht mehr verstärkt als durch die Schnitttiefe [14]. Man kann den Reckzustand durch Gefügeuntersuchung erkennen und somit nachträglich feststellen, ob ein Werkstück nach der Bearbeitung gegläht worden ist oder nicht. Auch beim Kaltwalzen oder Hämmern wird die Oberfläche stärker gereckt als das Innere. Wenn solche Stücke gegläht werden, so rekristallisieren die gereckten Metalle. Die Korngrösse bei der Rekristallisation hängt vom Reckgrad ab. Sie ist deshalb dann an der Oberfläche anders als im Innern. Verhältnismässig häufig tritt bei Stahl der Fall ein, dass die Oberfläche gerade mit dem sogenannten kritischen Reckgrad (Reckung um etwa 7 bis 15 %) behaftet ist. Dann wird sie bei der Rekristallisation grobkörnig und spröde.

f. Fehlstellen in der Oberfläche

Erzeugungsfehler finden sich vorzugsweise an den Oberflächen der Werkstücke, z.B. Überwalzungen, Überlappungen beim Schmieden, Raddolassen in Gußblöcken und in Formguss, Risse, Unebenheiten, unbeabsichtigte Einarbeitung kleiner Fremdkörper (Sand, Graphit, Späne anderer Metalle), Schlackenanhäufungen. Es ist daher üblich und in einigen Fällen erforderlich, dass die Oberflächenschicht der Gußblöcke vor der Weiterverarbeitung entfernt wird. Mitunter beseitigt man Fehlstellen an der Oberfläche, z.B. Löcher und Risse, durch Schweißen aus. Diese Schweißstellen liegen dann naturgemäss immer in der Oberfläche.

III. Anforderungen an den Aufbau und -betriebes an die Oberfläche.

Die Konstruktionsberechnung der Maschinenteile gründet sich auf die Wissenschaft der Mechanik und Festigkeitslehre. Sie benutzt die Elastizitätstheorien und bestimmt die Trägheits- und Widerstandsmomente der beanspruchten



- 22 -

Querschnitte. In die betreffenden mathematischen Formeln geht die Oberfläche nicht ein, da sie zum tragenden Querschnitt senkrecht liegt. Weil die Oberfläche in der Konstruktionsoberfläche nicht erscheint und auch sonst ihre Wirkungen auf das mechanische Verhalten der Werkstücke mathematisch nicht erfasst sind, hat man sich beinahe daran gewöhnt, von ihr abzusehen. Deshalb sei hier darauf hingewiesen, dass in Maschinenbetriebe alle beanspruchenden Kräfte die Oberfläche passieren müssen, ehe sie auf den tragenden Querschnitt einwirken.

#### ✓ Die Härte, Zähigkeit, Form und Glättung

Am sinnfälligsten ist die Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit für die Eigenschaft der Härte. Unter der Härte eines Werkstoffes versteht man seinen Widerstand gegen das Eindringen anderer Körper in seine Oberfläche. Die Oberfläche soll im Betriebe Druck- und Stoßkräfte von anderen Körpern aufnehmen, ohne ihre Form zu ändern. An den Oberflächen der Werkstücke muss die vorgeschriebene Härte vorhanden sein, und es ist gleichgültig, ob die Härte im Innern etwas geringer ist. Dementsprechend wird bei der Einsatzhärtung und der Verstickung von Stahl oder der Eloxierung von Aluminium nur an der Oberfläche eine hohe Härte erzeugt.

Nicht anders verhält es sich mit der Eigenschaft der Zähigkeit. Die Rissgefahr besteht fast nur in der Oberfläche, eine Kerbempfindlichkeit ist im Innern weniger gefährlich als aussen. Die moderne Formgebung der Maschinenelemente, die von Thom und seinen Schülern [15, 16, 17] eingeführt worden ist, sorgt dafür, dass der Kraftlinienfluss durch die Oberfläche möglichst gleichmässig ist und dass Kerbwirkungen an der Oberfläche vermieden werden.

Die mechanischen Spannungen werden dabei durch Kraftlinien dargestellt, ähnlich wie man den Begriff der magnetischen Kraftlinien bei Beschreibung der magneti-

- 23 -

schen Felder angewandt. Durch Feinmessung der Dehnung bei Beanspruchung der Maschinenelemente lässt sich die Verteilung der Spannungen feststellen. Wenn man eine bestimmte Kraft pro Fläche als Kraftlinie definiert, kann man die Kraftlinien zeichnen. Abb. 2 zeigt die Formgebung einer Schraubenverbindung in alter Weise und nach der modernen Art. Man sieht, dass die Kraftlinien in der Darstellung 3 von Abb. 2 gleichmäßiger und unter Vermeidung örtlicher Zusammendrängung verteilt sind. In diese Betrachtungsweise kann man auch die Oberfläche einführen und dabei ihre mechanische Beanspruchung mathematisch erfassen. Die Zahl der Kraftlinien, die durch die Flächeneinheit der Oberfläche laufen, gibt ein Mass für deren mechanische Beanspruchung, insbesondere kann man den Winkel, den der Kraftfluss mit der Oberfläche bildet, bestimmen. Die Kraftlinien sollen überall senkrecht in die Oberfläche eintreten. Sobald sie schräg auf die Oberfläche auftreffen entstehen Komponenten in der Oberfläche selbst, die sich mit der Oberflächenspannung summieren. Dann ist eine weitere Verzerrung der Oberflächenatome unvermeidlich, und bei Dauerbeanspruchung werden Risse entstehen. Besondere Bedeutung hat die Glättung der Oberfläche. Die modernen Bearbeitungsverfahren durch Feindrehen, Schleifen, Schwabbeln, Läppen, Feinpolieren u.a. sind hoch entwickelt und wissenschaftlich untersucht [18, 19, ~~worben~~]. Bei mikroskopischer Beobachtung bemerkt man, dass jede bearbeitete, auch eine feingpolierte Oberfläche, sehr uneben ist. Man hat mannigfaltig Verfahren entwickelt, um die Form und Glättung der Oberfläche festzustellen und zu bewerten. Die apparativen Hilfsmittel, die Berechnungsverfahren sowie die eingeführten Begriffe sind so vielseitig geworden, dass sich die "Technische Oberflächenkunde" zu einem Sondergebiet entwickelt hat. Hier sei auf das Buch von G. Schmoltz [20] verwiesen. Bei den in den Vereinigten Staaten von Amerika entwickelten Verfahren zum Feinzieh-

- 24 -

schleifen (Superfinish) [21]. Werden die Schleifsteine mit verhältnismässig geringem Druck ( $1 \text{ kg/cm}^2$ ) gegen das umlaufende Werkstück (Welle oder Bohrung) angedrückt und dabei in radialer Richtung schnell und mit kurzen Hieben hin und her bewegt. Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt 6 bis 20 m/min, die Rauigkeit der Oberfläche wird auf  $0,2 \mu$  herabgedrückt. Wird die Härte des Schleifsteines sorgfältig auf die Härte des Werkstoffes abgestimmt, so dass am Schluss des Arbeitsganges Fläche auf Fläche tritt, werden Rauigkeiten von  $0,1 \mu$  erreicht (Feinstziehschleifen).

## 2. Die Bearbeitbarkeit

Fast alle Bearbeitung geschieht an der Oberfläche. Deshalb muss in diesem Bericht auf die Beziehung zwischen der Bearbeitbarkeit und der Oberflächenbeschaffenheit eingegangen werden. "Bearbeitbarkeit" ist ein Sammelbegriff. Die Bearbeitungen durch Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen u.a. beanspruchen den Werkstoff verschieden und erfahren daher auch verschiedenen Widerstand. Man erhält verschiedene Schlüsselfür die Standzeiten und den Kraftbedarf bei den verschiedenen Bearbeitungsarten und muss deshalb unterscheiden zwischen der "Drehbarkeit", "Fräsebarkeit", "Schleifbarkeit" usw. Solche ausführliche Darstellung würde aber in Rahmen dieses Berichtes zu umfangreich sein. Im speziellen Teil B dieses Berichtes (Seite 32 u. folgende) wird daher der zusammenfassende Begriff "Bearbeitbarkeit" beibehalten. Jedoch werden bei Zahlenangaben mitgeteilt, mit welcher Bearbeitungsart diese festgestellt sind.

## 3. Die Lagerreibung

### a. Der Gefügebau der Lagermetalle

Von jeher galt die Auffassung, dass ein Lagermetall aus harten Einlagerungen in einer weicheren Grundmasse bestehen soll. Diese Meinung wird durch die Erfahrung bestätigt, denn alle guten Lagermetalle sind so aufge-

- 25 -

baut. Zur Deutung dieser Tatsache sind die Kugellager zum Vergleich herangezogen worden. Ebenso wie die Kugeln nur mit wenigen Punkten trügen, <sup>n</sup>ähmen auch nur die wenigen aus der Oberfläche hervorstehenden harten Bestandteile die Lagerkräfte auf. Diese Meinung scheint den Verfassern abwegig zu sein, denn der Vorteil der Kugellager besteht in der rollenden Reibung. Die harten Teile der Lagermetalle sind aber nur auf gleitende Reibung beansprucht. Sobald die Glasbröckel ins Rollen kämen, würden sie das Lager zerstören. Wenn nur die hervorstehenden harten Bestandteile trügen, so würde auf ihnen die Flächenpressung und damit der Reibwiderstand vervielfacht. Man hat offenbar die Bedeutung der Ölschmierung nicht genügend berücksichtigt. Die etwas vertiefte Oberfläche der weicheren Grundmasse wirkt als viel verzweigte, alle Stellen des Lager bedeckende Oelrut. Der tragende Ölfilm bleibt in der <sup>g</sup>roßen Lagerfläche erhalten und überzieht sowohl die etwas hervorstehenden harten Einlagerungen als auch die etwas vertiefte weichere Grundmasse. Die Flächenpressung entspricht also den aus der Grösse der Schalenoberfläche berechneten Werten. In einem ungeschmierten trockenen Lager würde eine aus harten und weichen Bestandteilen aufgebaute Schale sich wegen ihrer Rauigkeit und der vergrösserten Reibung auf den hervorstehenden harten Teilen ungünstiger verhalten als eine homogene. In der Literatur wird ferner die Ansicht vertreten, dass die Vertiefung der weicheren Grundmasse sich erst im Lagerbetrieb bildet, weil beim Einlaufen der weichere Gefügeanteil stärker abgegraut würde. Man geht also von der Vorstellung aus, dass nach der Fertigung des Lagers die harten und weichen Bestandteile in einer idealen Zylinderform liegen. Auch diese Auffassung scheint den Verfassern richtig zu sein. Sie geht von der begrifflichen Vorstellung einer Zylinderfläche aus und setzt voraus, dass eine solche ideale Fläche bei der

- 26 -

Lagerfertigung verwirklicht werden könnte. In Wirklichkeit besteht heute keine technische Möglichkeit, aus einem heterogenen Werkstoff eine ideale Zylindermentelfläche herzustellen. Bei der Bearbeitung, insbesondere durch Schleifen und Polieren, wird notwendigerweise die weichere Grundmasse mehr abgearbeitet als die harten Einlagerungen. Die Härteunterschiede sind also schon vor dem Einlaufen des Lagers vorhanden. Wenn sie nicht schon bestünden, so könnten sie beim Einlaufen nicht entstehen, weil eine stetige Fläche eine zweite ebenfalls stetige nicht instetige abnutzen kann. Die für Lagerschalen günstigste Oberflächenform mit ervorstehenden harten Einlagerungen in vertiefter weicherer Grundmasse entsteht also schon bei der Lagerschalenfertigung und bewirkt dann im Lagerbetrieb eine gleichmässige Ölbenetzung.

b. Ölfilm. Grenzreibung. Verschleissreibung

Das wesentliche Moment für den Lagerbetrieb ist also die Schmierung. Auf diesem Gebiete der Technisch-wissenschaftlichen Forschung ist in den letzten Jahren viel gearbeitet worden. Die älteren Vorstellungen über Totlauf und Verschleiss der Lager sind überholt und haben neuen Auffassungen Platz gemacht, in denen die Eigenschaften und Wirkungen des Epilamens in Vordergrund stehen. Die folgenden Darstellung folgt der klaren und durch ausführliche Versuche gestützten Beschreibungen von H. Lüpfer<sup>[22]</sup>.

Die fetten pflanzlichen Schmieröle bestehen aus langen Kettenmolekülen. Diese werden mit ihrem einen Ende an die Metalloberfläche gebunden, wobei Metallatome in die Fettmoleküle eintreten. Es findet also eine Art Verseifung des Metalls statt. Die Fettmoleküle lagern sich mit ihren Kettenachsen winkelrecht zur Metalloberfläche, wobei sie dicht und lückenlos aneinander anschliessen. Das Epilamen ist nach dieser Auffassung eine Art dichter



Behaarung der Metalloberfläche durch die Ölmoleküle, die eine dünne, viskose und zugleich fixierte, also zähe Schicht bilden.

In gut gewarteten Maschinen ist eine reichliche Ölzufuhr vorhanden. Dann bildet sich bei Umlauf der Lager eine unter dynamischem Druck stehende zusammenhängende Ölschicht, die gemäss der hydrodynamischen Lagertheorie alle Kräfte aufnimmt und überträgt. Das Epilamen bleibt unangegriffen, und die Art der Lagermetalle kommt nicht zur Geltung. Der dynamisch tragende Ölfilm fehlt beim Anlaufen der Maschinen und bei mangelnder Ölzufuhr. Dann muss das Epilamen die Lagerkräfte aufnehmen, und die Reibung und die Erwärmung sind wesentlich grösser. Die Natur des Lagermetalles kommt zur Geltung, da ja von ihr die Bindung und der Aufbau des Epilamens abhängt und da die metallische Grenzschrift von ungewöhnlich hohen Kräften unter Erwärmung beansprucht wird. Diese Lagerbeanspruchung bezeichnet man als "Grenzreibung". Wird aber die Ölmenge so gering, dass Epilamen nicht mehr dicht schliesst, sondern lückenhaft und untermischt mit anderen Flüssigkeiten oder Gasen ist, so setzt alsbald die Reiboxydation ein. Das Metall wird oxydiert. Es entsteht Verschleissstaub, der trocken reibt. Hervorstehende Metallteilchen bröckeln ab. Diese Beanspruchung der Lager bezeichnet man als "Verschleissreibung". Ein Umlauf völlig ohne Öl ist ordnungsmässig nicht möglich, da das Lager sofort fressen würde, indem Welle und Schale verschweissen bzw. die Schale schmilzt. Die Güte der Lagermetalle ist danach zu beurteilen, wie sie sich bei der Grenzreibung und der Verschleissreibung verhalten.

#### 4. Der Verschleiss

Unter Verschleiss versteht man die mechanische Abnutzung der Oberflächen durch reibende feste Körper. Die Abnutzung durch strömende Flüssigkeiten wird als Erosion, die Aushöhlung durch tropfende Flüssigkeiten



wird als Kavitation bezeichnet, den chemischen Angriff ohne mechanische Kräfte nennt man Korrosion. Beim Verschleiss sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. die mechanische Abnutzung geschmierter Reibflächen,
2. die mechanische Abnutzung ungeschmierter Aussenflächen. Beispiele für je mechanische Abnutzung ungeschmierter Aussenflächen sind der Walzenverschleiss in Walzwerken, der Verschleiss der Eisenbahnschienen und Eisenbahn-Radreifen und die Abnutzung der Raupen in Traktoren und Panzerwagen. Solcher mechanischer Abrieb ungeschmierter Aussenflächen tritt im Motorenbau nur in untergeordnetem Masse auf. Hierhin gehört etwa der Verschleiss der Antriebsflächen von Transmissionsrädern oder von ungeölten Kupplungen. Im Motorenbau handelt es sich vorzugsweise um die mechanische Abnutzung geschmierter Reibflächen, nämlich dem Verschleiss der Lager und Führungen. Die Drücke in geschmierten Führungen sind meist so gering, dass ein Verschleiss praktisch nicht eintritt. Zu betrachten bleibt also der Verschleiss der Reiblagerteile. Da der Verschleiss der Maschinenlager unabwendbar ist, würden sowohl die Lagerwelle als auch die Schalen in gleicher Weise angegriffen werden, wenn man beide aus Stahl fertigen würde. Bequem und wirtschaftlich auswechselbar sind nur die Schalen. Deshalb fertigt man diese aus Metallen, die weicher und abnutzbarer als Stahl sind, und erreicht dadurch, dass die Lagerwellen unangegriffen bleiben. Aus Stahl sind daher nur die Wellen, niemals aber die Lagerschalen hergestellt. Der Verschleiss betrifft nur die Schalen, die Wellen werden nur angegriffen, wenn ein Lager frisst. Die Verschleissfestigkeit der Stahloberflächen erfordert daher in diesem Bericht keine besondere Betrachtung. Der Verschleiss der Lagermetalle wird im speziellen "Teil B, Abschnitt "Lagermetalle" (Seite 57 u. folgende behandelt werden.

- 29 -

## 5. Die Korrosion

Die Korrosion ist ein auf der Oberfläche beginnender elektrochemischer Vorgang. Sobald das Metall von einem Elektrolyten benetzt wird - dies ist praktisch bei \* jeder wässerigen Befeuchtung der Fall - entstehen elektrische Lokalströme zwischen den heterogenen Bestandteilen der Oberfläche (Abschnitt "Es gibt technisch kein homogenes Metall" Seite 12<sup>1</sup>). Bei der Ungleichartigkeit und mitunter ungleichmässigen Verteilung der Heterogenitäten ergreift die Korrosion nicht gleichmässig die Oberfläche, sondern in der Regel ungleichmässig. Am gefährlichsten ist der sogenannte "Lochfrass". Die Korrosion beginnt in diesem Falle nur an wenigen Punkten der Oberfläche und schreitet von hier aus in die Tiefe fort. Auf einer Stahloberfläche führt bereits eine Verschiedenheit der hinzutretenden Luftsauerstoffmenge zu einer die Korrosion fördernden Heterogenität. Man spricht von verschiedener "Belüftung". Der Boden einer durch örtliche Korrosion entstandenen kleinen Vertiefung bleibt unbelüftet. Er wirkt dann elektrochemisch als Anode gegen die übrige Oberfläche. Im Boden der Vertiefung fliesst ein dichter Lokalstrom, der den Lochfrass hervorruft. Ungünstig ist auch die "interkristalline Korrosion", welche an den Korngrenzen der Oberfläche einsetzt und von hier aus auf den Korngrenzen der Metallkörner ins Innere vordringt. Am wenigsten gefährlich ist eine Korrosion, die gleichmässig angreift, die gesamte Oberfläche allmählich abträgt.

## 6. Temperaturwirkungen

### a. Abkühlung

Die meisten Stähle haben etwa bei Zimmertemperatur den Steilabfall der Verformbarkeit. Bei Abkühlung auf Temperaturen unter 0° C verspröden sie. In scharfer Winterkälte können z.B. Eisenbahnschienen, wenn sie befahren werden, brechen, nur bei besonders sorgfältig

- 30 -

desoxydierten und mit etwas Aluminium (bis 0,2%) legierten Stählen, z.B. dem Krupp'schen I-Z-Stahl, begünstigt der Stahlabfall der Korbzähigkeit im Gebiet so tiefer Temperatur, dass die Stähle auch bei Winterkälte zäh bleiben. Motorteile aus Stahl sind daher meist gegen Temperaturen, die stark unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegen empfindlich und würden während solcher Abkühlung ihre Zähigkeit verlieren. Kupfer- und Aluminium-Legierungen besitzen diese Kältesprödigkeit nicht. Mit einer starken zur Vergrößerung des Stahles führenden Abkühlung muss nur in Sonderfällen gerechnet werden (Flugzeuge, Maschinen in Polargegenden). Eine ganz allgemeine Schädigung auch durch mässige Abkühlung besteht in der Erhöhung des Korrosionsangriffes. In ungeheizten Räumen oder an freier Luft beschlagen sich die Metallteile mit Wassertropfen, die dann bei Erwärmung wieder verdunsten. Bei der Verdunstung reichert sich in den Tropfen der Sauerstoff- und Kohlensäuregehalt bis zur Übersättigung an. Auch die nur spurenweise in den Tropfen gelösten elektrolytbildenden Salze gelangen bei Verdunstung zu korrodierenden Konzentrationen. Ein oft wiederholtes Betauen und Trocknen begünstigt deshalb sehr die Korrosion. Wenn ein Motor stark abgekühlt ist und man ihn dann wieder warm laufen lässt, so geschieht seine Erwärmung ungleichmässig. Das Spiel über den Paßflächen, durch die Kontraktion bei der Abkühlung schon etwas verkleinert, muss bei ungleichmässiger Erwärmung ungleichmässig werden. Auch können infolge verschiedener Wärmeverbreitung von bewegten oder ruhenden Teilen Kantenpressungen auftreten, während zugleich infolge der höheren Viskosität der Schmiermittel die Leerlaufkraft erhöht ist. Jeder Warmlaufenlassen nach starker Abkühlung führt deshalb zu einer übermässigen Beanspruchung der arbeitenden Oberflächen. Man sucht deshalb, die Maschinen möglichst vor starker Abkühlung zu bewahren.

- 31 -

**b. Erhitzung.**

Zu akuter Schädigung der Oberfläche kann eine Überhitzung führen. Wenn die Lager so heiss werden, dass das Öl verdampft und schliesslich auch das Epilemen vergast wird, so ist, wenn der Motor nicht sogleich still gesetzt wird, ein Fressen der Lager und damit die Zerstörung der reibenden Oberflächen unausbleiblich. Einzelne Konstruktionsteile, z.B. Auspuffventil-Teile, müssen regelmässig hohe Temperaturen ertragen. Zu ihrem Bau wendet man warmfesten und unzerfesten Werkstoff an. Näheres hierüber wird im speziellen Teil B, Abschnitt "Stahl", insb. Seite 37 und Tafel 2, berichtet.

- 32 -

3. Spezieller TeilI. Stahl1. Der Gefügeaufbau

Die Gefügekunde des Stahles hat sich zu einer Sonderwissenschaft entwickelt. Eine umfassende Darstellung kann die Verfasser in ihren Atlas Metallographicus niedergelegt. Im Rahmen dieses Berichtes kann nur eine kurze Übersicht gegeben werden.

a. Nicht gehärteter KohlenstoffstahlGefügebestandteile:

Ferrit, Perlit, Schlackeneinschlüsse, in Sonderfällen auch Temperkohle.

Grossgefüge (Mikrostruktur):

Korngefüge, Netagefüge, Widmannstätten'sches Gefüge, primäres und sekundäres Farnenbauggefüge, Globularferrit, primäres und sekundäres Zementitgefüge, Kaltstirngefüge.

Feingefüge (Mikrostruktur):

Ferrit in Form von, als Netz oder Flecken; Ferritlöcher, streifiger Perlit verschiedener Ausbildung; körniger Perlit verschiedener Körnung, Korngrenzengementit; sekundäres Zementitnadeln; tertiärer Zementit, tertiäres Nitrid; Kristallsteingran; des Phosphors; Silikat-, Oxyd-, Sulfidschlacken. In kaltgerasteten Stählen: Gleitschichten, Gleitpakete, Rekristallisationsgefüge.

Die Körner der ferritischen Grundmasse sind meist abgerundet, die von ungeglühten Widmannstätten'schen Gefügen scharf.

b. Gehärteter oder vergüteter KohlenstoffstahlGefügebestandteile:

Austenit, Martensit, Troostit, Ferrit, Zementit, Schlackeneinschlüsse, in Sonderfällen auch Temperkohle.



- 33 -

Grossgefüge:

Randschicht, Übergangsschicht, Kernschicht.

Kleingefüge:

Austenit und Martensit verschiedener Form und Gestalt. Troostit in mannigfacher Ausbildung, Zementit körnig mit verschiedener Korngrösse, Anlassgefüge, Vergütungsgefüge, Zwischengefüge.

Die Körner der Grundmasse sind nadelig und unregelmäßig.

c. Sonderstahl

Zu den unter a und b genannten Gefügebestandteilen und Gefügeformen treten Sonderkarbide, Metallide und Eutektika hinzu.

Die Gefügemerkmale des Stahles sind so vielseitig und so eindeutig mit der Erzeugung und Vorbehandlung verknüpft, dass man aus der Gefügebeobachtung nachträglich das Herstellungsverfahren und die Bearbeitung des Stahles feststellen kann. Ein erfahrener Metallograph vermag die gesamte Vorgeschichte eines Stahlgegenstandes aus der Beschaffenheit des Gefüges zu ermitteln. Der Gefügebefund gestattet ferner meist ein Urteil über die mechanischen und chemischen Eigenschaften des Stahles und lässt die Ursachen für Fehler des Stahles erkennen.

2. Die Korrosion der Stahloberflächen

An feuchter Luft und in sauerstoffhaltigem Wasser bilden sich an der Oberfläche von Eisen und Stahl alsbald Hydroxyde und Oxyde, die leider nicht wie das Aluminiumoxyd auf dem Aluminium eine dichte beschützende Haut bilden, sondern locker, luft- und wasserdurchlässig sind. Das Rosten geht also weiter bis in den Kern der Stücke, die den vorgeschichtlichen Gräbern ehemals beigegebenen Eisenwaffen und -geräte bestehen heute, wenn sie noch an Ort und Stelle liegen, völlig aus Eisenoxydhydroxyd (Karbonaten u.a.) Häufig in feuchten Zäunen rosten mitunter schon in Jahresfrist



- 34 -

durch. Andererseits tan einige Eisenketten an Zugbrücken und eisernen Truhenschlösser oder Tore aus dem Mittelalter heute noch ihren Dienst. Eisernen Eisenbahnschwellen halten jahrzehntelang, und die Eisenbahnschienen werden nicht so sehr durch Rost als durch Verschleiss unbrauchbar. Kleine Unterschiede in der Herstellung und Legierung des Stahles haben offenbar einen grossen Einfluss auf die Rostgeschwindigkeit, z.B. scheinen kleine Kupfergehalte das Rosten zu verzögern. Ausschlaggebend sind die örtlich so verschiedenen Korrosionsbedingungen. In Seeluft und Seewasser vergeht Eisen schnell. In der rauchigen, sauren Industrieatmosphäre korrodiert es viel schneller als in reiner Landluft. In den meist trockenen staubarmen Räumen, in denen Motoren aufgestellt sind, braucht man die Korrosion nicht zu fürchten. Sie könnte dort nur auf den Reibflächen stören. Die übrigen an der Atmosphäre liegenden Oberflächen der Maschinenteile würden ohne Pflege mit der Zeit durch Korrosion ihr schmutziges Aussehen verlieren, ihre Haltbarkeit aber würde innerhalb der Lebensdauer der Maschinen nicht beeinträchtigt werden. Stärker durch Korrosion gefährdet sind eiserne, im Freien arbeitende Apparate, z.B. Baggerketten, Teile von Seilbahnen u.dergl., im Maschinenbetriebe dagegen, ausser den schon erwähnten Reibflächen, nur einige von feuchtem Dampf oder Abgasen betroffene Teile (Turbinenschaufeln, Abwasserleitungen, Auslassventile, Kaminteile u.a.)

#### a. Die Passivität des Eisens

Das viel unedlere Aluminium und ebenso das elektro-negativere Magnesium überziehen sich an ihrer Oberfläche in Luft und Wasser alsbald mit einer dichten Oxidhaut, die eine weitere Korrosion verhindert. Auch das Eisen vermag unter bestimmten Bedingungen eine solche die Korrosion hemmende Haut zu bilden. Wenn man Eisen in konzentrierte Salpetersäure bringt, so färbt es sich etwas dunkler und wird von der Säure nicht

- 35 -

angegriffen. Man kann konzentrierte Salpetersäure in eisernen Gefässen aufbewahren. Das Eisen ist "passiv" geworden. Es hat sich mit einer festhaftenden, dichten Oxydhaut besonderer Art überzogen. Diese Oxydschicht ist sehr dünn und besteht nur aus einigen Atomschichten. Bei Einwirkung reduzierender Ionen (Salzsäure, Chloride) wird sie zerstört. Offenbar vermag das Eisen-oxyd in zwei verschiedenen Formen zu entstehen. Etwas Ähnliches liegt beim Blei vor. In Schwefelsäure bildet sich auf den Metalloberflächen in der Regel ein weisses durchlässiges Sulfat, so dass das Metall von der Säure zerissen wird. In bestimmten Fällen aber entsteht eine korrosionshemmende Sulfathaut aus dunkel gefärbtem Anglesit [20]. Besondere Neigung, passiv zu werden, hat das Chrom. Durch die umwälzende Entdeckung von Prof. E. Lauber ist erkannt worden, dass Eisen-Chrom-Legierungen mit mehr als 12 % Chromgehalt an der Luft und im Wasser passiv sind. Diese sind die "nichtrostenden Stähle". Da ihre Korrosionsfestigkeit auf der dünnen Oxydhaut beruht, mit der sie sich sofort überziehen so sind sie anfällig gegen Chloridionen und reduzierenden Säuren. Durch Erhöhung des Chromgehaltes und beträchtlichen Nickelzusatz lässt sich ihre Widerstandsfähigkeit erhöhen, und ein Molybdänzusatz macht sie sogar ziemlich unempfindlich gegen Königswasser. Das grosse Anwendungsgebiet dieser Stähle ist der Apparatebau. Die meisten Konstruktionsteile im Motorenbau sind, wie schon erwähnt, keiner hohen Korrosionsgefahr ausgesetzt.

#### b. Korrosion in der Wärme, Warmfestigkeit

An einigen korrosionsgefährdeten Stellen des mittleren Maschinenbaues wirkt nicht nur Korrosion, sondern zugleich auch hohe Temperatur auf die Oberfläche ein, z.B. in Auspuffventilen. Die an solchen Stellen angewandten Stähle müssen nicht <sup>nur</sup> korrosionsfest, sondern auch mechanisch warmfest und zunderfest sein. Der Vollständigkeit halber sei in Zahlentafel 2 eine Über-

- 36 -

sicht über die härtesten und z.T. dabei korrosions- und zunderfesten Stähle angegeben:

Gegenwärtig vorrätig war, durch Zulegioren von Klob, Witten und Witten die Härtefestigkeit noch sehr zu steigern.

#### c. Schutzüberzüge

Die Anwendung der härtesten Stähle ist für die meisten Zwecke zu teuer. Man schützt in einfacher Weise die nicht zu sehr beanspruchten Oberflächen durch Korrosionsschutzüberzüge. Gemäss dem einleitend dargelegten Vorgehen, das Thomas Witten hier die Schutzüberzüge nicht ausführlich behandelt, sei nur ein kurzer Überblick über metallische Schutzschichten gegeben. Die aufgetragenen Schutzschichten sind entweder elektrochemisch edler als das Eisen (z.B. bei Verzinkung, Nickelplattierung, Verchromung u. dgl.) oder unedler (z.B. bei der Verzinung). Die edleren Überzüge sind korrosionsfester als das Eisen und geben einen guten Korrosionsschutz, solange sie nicht bleiben. Sobald sie aber abgerieben und abgewaschen, entsteht an der Stelle ein elektrochemischer Kontaktstrom zwischen der Schutzschicht und dem Stahl. Das unedlere Eisen wirkt bei Befuchung der Feuchtelemente mit einem Elektrolyten zur Anode und die Schutzschicht zur Kathode. Das Eisen wird dann stark angegriffen. Wenn sich stattdessen eine Verzinnschicht gebildet haben, kann sie nicht beseitigen, sondern muss neu verzinkt werden. Ein unedlerer Überzug wirkt zwar mit der Zeit selbst korrodiert, aber auch wenn dann die Eisenoberfläche partiell entblösst ist, bleibt sie noch geschützt. Letzteres gilt nämlich das edlere Eisen zur Kathode. Das Eisen verkorrodiert auch weiterhin nur die unedlere Schutzschicht und lässt das Eisen unangegriffen.

Für den Schiffsbau muss der Stahl mitunter

- 37 -

plattiert. Die Plattierung mit Messing oder Bronze ist technisch gut durchgearbeitet, die Plattierung mit Aluminium hat aber eine ungelöste Aufgabe. Ausser metallischen Schutzschichten werden vielfach nichtmetallische Überzüge verwendet (Lacke, Lössige, Farbenanstrich, Zinkschichten, Phosphatschichten u.a.).

### 3. Die Segierung des Stahles

Besondere Bedeutung für die Oberflächenbeschaffenheit des Stahles hat die Segierung. Beim Erstarrten von Stahlblöcken und -gussteilen entmischt sich die Legierung dergestalt, dass die Aussenschicht sich an Eisen anreichert, während die Restschmelze im Kern der Stücke mit erhöhten Gehalten an Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel und den anderen Legierungsbestandteilen erstarrt. Im Segierkern kann der Phosphorgehalt örtlich auf das Zehnfache und mehr zunehmen, der Kohlenstoffgehalt um ca. 100 %, auch alle anderen Bestandteile, z.B. Mn, Si, Cr, Ni, u.a., sind etwas angereichert. Zugleich sammelt sich in der Restschmelze die Schlacke an, auch können hier bevorzugt porige oder löcherige Stellen entstehen. Die vom Rande in die Schmelze verwachsenden Kristalle schwinden bei der Erstarrung, daher wird die vor den Kristallen befindliche Schmelze zum Rande gezogen. Beschreibt die Erstarrung nach dem Zweiphasen-Gleichgewicht Mischkristall-Schmelze, (Fall 1) so wachsen dabei die Kristalle so lange weiter an, bis sie alle Zwischenräume ausgefüllt haben. Dann kann keine weitere Schmelze mehr zum Rande hinfließen. Gelingt aber die Erstarrung in ein Dreiphasen-Gleichgewicht Mischkristall-Eutektikum, (Fall 2), so kann die zum Rande geströmte Schmelze nicht zu Mischkristallen erstarrten, sondern muss ein Eutektikum zwischen den zuerst erstarrten Kristallen bilden. Der Fall 1 wird als "normale Block Segierung" bezeichnet. Die Anreicherung an Legierungsbestandteilen bildet sich dabei im Inneren der Gusstücke. Bei Fall 2 dagegen ergibt das zwischen den Mischkristallen erstarrende Eutektikum



- 38 -

eben dort die Anreicherung der eutektischen Komponente. Der bei niedriger Temperatur schmelzende Bestandteil wird also an der Rinde angereichert. Dies bezeichnet man als "umgekehrte Blockseigerung". Die hier von den Verfassern gegebene einfache Deutung der normalen und umgekehrten Blockseigerung ist in der Literatur bisher nicht enthalten. Man hat mit Rücksicht auf die Leistung die Inhalte an den stark seigernden schädlichen Bestandteilen Phosphor und Schwefel so niedrig festgesetzt, dass sie sogar in den Seigerungsstellen trotz der hohen Anreicherung noch erträglich sind. Wenn der Phosphor überall gleichmässig im Stahl verteilt bliebe, so brauchte man seine Höchstgehalte nicht nach hundertstel Prozent zu bemessen. Die Seigerstellen sind härter und spröder, auch weniger gut schweisbar als die Aussenschichten.

Die Seigerung lässt sich mit den heutigen metallurgischen Verfahren nicht hindern und wird wohl niemals vermieden werden können, da sie auf den Gesetzmässigkeiten der Zustandsschaubilder beruht. Nur wenn die Stahlschmelze in allen ihren Punkten vor der Erstarrung bis unter ihre Soliduslinie unterkühlt werden könnte, müsste die Seigerung ausbleiben. Solche tiefe Unterkühlung scheint aber unmöglich zu sein. Der Konstrukteur muss also bei Stahl immer die Seigerung in Betracht ziehen. Bei richtig geleiteter Erstarrung der Stahlblöcke und Gusstücke liegt der Seigerkern im Innern, während die Aussenschicht in ziemlicher Dicke gesund ist. Die Verarbeitung durch Walzen und Ziehen geschieht meist symmetrisch, so dass dabei die Seigerung im Kern liegen bleibt. Man kann selbst im Schliff feinausgezogener Stahldrähte nur im Kern die Seigerung beobachten, während die Rinde der Drähte seigerfrei ist. Bei unsachgemäss geleiteter Erstarrung ungünstig geformter Stahlblöcke kann aber die Restschmelze stellenweise bis an die Oberfläche der Blöcke reichen, wenn z.B. scharfkantige Vierkantblöcke

sehr schnell erstarren, so erstreckt sich das Restschmelzenggebiet bis an die vier Kanten. Die Verfasser untersuchten Eisenbahnschienen, die aus derartigen Blöcken gewalzt waren. In diesen trat die Seigerung an beiden Rändern der Schienenlaufläche und an beiden Seiten des Schienenfusses in vier Längsstreifen an die Schienenoberfläche. Auch bei der mitunter unvermeidlichen asymmetrischen Formgebung durch Freihandschmieden oder Geseckschmieden kann die Seigerung bis nahe an die Oberfläche gedrückt werden. Je näher die Seigerung der Oberfläche liegt, desto eher wird sie bei der spanabhebenden Bearbeitung abgeschnitten. Die Späne brechen dann an diesen harten Stellen ab. Die Schneidwerkzeuge und mit ihnen die Werkzeugmaschinen erhalten Schläge. Auch wenn die Bearbeitung durchführbar ist, liegen in der fertig bearbeiteten Oberfläche härtere und schlackenreichere Stellen mit erhöhter Korbempfindlichkeit.

#### 4. Schlackeneinschlüsse

Auch eine genau der seigerstellen freie Stahloberfläche enthält in mikroskopischer Grössenordnung stets mehr oder weniger Fehlstellen, denn kein Stahl (auch kein anderes Metall, vielleicht mit Ausnahme von Edelmetallen, ist völlig schlackenfrei. Man mache sich aber von der Forderung der unvermeidlichen winzigen Schlackeneinschlüsse keine übertriebene Vorstellung. Als die Technik bis vor 150 Jahren nur Schmiedestahl kannte und noch keinen Gusstahl, enthielten alle Stahlerzeugnisse unverhältnismässig mehr Schlackeneinschlüsse als heute. Aber die Schwerter und Lässer, die Drähte und Flanschen, welche man aus gutem Schweisstahl fertigt, waren vorzüglich. Nicht alle Schlacken wirken ungünstig. Feinverteilte Kieselsilikat-schlacke verhält sich mechanisch ähnlich wie der Zementit. Sie springt nicht aus und platzt nicht, sondern ist ein fester tragender Bestandteil des Klein-



- 40 -

gefügt. Unzulässig sind grosse Schlackenteile und Schlackenanhäufungen, wie denn ja auch Karbidanhäufungen und übermässige grosse Karbidkristalle vermieden werden müssen. Die eigentlich gefährlichen Schlacken hat erst der Gussweil gebracht, nämlich die Siliciumschlacke und die leichter gebauten Oxyde. Der Anspruch an Schlackenarmut an der Oberfläche ist sehr verschieden nach den Verwendungszwecke der Werkstücke. Hohe Anforderungen an Schlackenreinheit stellt z.B. die Erzeugung der Kugellagerteile. Bei den nur mit einem Differenzial ihrer Oberfläche tragenden Kugeln kommt es auf völlige Gleichmässigkeit des Werkstoffes an. Deshalb hat zuerst von den Kugellagerfabriken die Abkühlprüfung auf Schlackengehalt eingeführt worden. Man vergleicht das mikroskopische Gefügebild des abkühlenden Stahles mit "Gefügerichtreihen" [29]. Diese enthalten die Gefügebilder von Stählen mit bekannten abgestuften Schlackengehalt. Man gewinnt so eine Vergleichszahl, die eine Bewertung der Stähle bei der Abkühlprüfung gestattet.

##### 5. Die Bearbeitbarkeit

Die erste Bedingung für gute Bearbeitbarkeit des Stahles ist gleichmässige Härte und Zähigkeit. Schon im Abschnitt "Die Seigerung des Stahles" (Seite 38/40) war darauf hingewiesen worden, dass Ungleichmässigkeiten der <sup>zu</sup> bearbeitenden Oberfläche durch Seigerung verursacht werden können. Zu erstreben ist, dass die Abkühlung der Stücke nach dem Glühen und Vergüten an allen Stellen ~~gleich~~ schnell bzw. gleich langsam geschieht. Jede Änderung in der Abkühlungsgeschwindigkeit ändert die Härte in dem Sinne, dass bei beschleunigter Abkühlung die Härte grösser wird. Wesentlich für die Bearbeitbarkeit aller Stähle mit Kohlenstoffgehalt unter etwa 0,2% ist die Form der Karbidausbildung.

- 41 -

Der lamellare Perlit macht den Stahl härter als der körnige. Die Bearbeitbarkeit wird durch lamellaren Perlit so sehr erschwert, dass Kohlenstoffstähle von etwa 0,45% an Kohlenstoff nicht nur bearbeitet werden können, wenn ihr Perlit körnig ist. Übereutektoidische Stähle mit Zementitatz erhalten selbst bei verhältnismässig hoher Schnittgeschwindigkeit noch eine raue Oberfläche, während bei körnigem Perlit leicht eine glatte Oberfläche erzielt wird<sup>[30]</sup>. Für die Bearbeitung auf automatischen Drehbänken ist ein spritziger Span erforderlich. Weicher Stahl hat einen langen, lockigen, für Drehautomaten ungeeigneten Span. Man versprödet deshalb absichtlich den Stahl, z.B. durch Legierung mit etwas Schwefel oder Phosphor, so weit, dass der Span spritzig wird, ohne dass die Versprödung die mechanische Bruchbarkeit des Stahles beeinträchtigt. Dies geschieht z.B. bei Stahl für Schraubenmutter. Mit dem gleichen Ziele versprödet man das Aluminium durch Zusatz von Blei.

## II. Grauguss

### 1. Der Gefügebau

Eine ausführliche Darstellung des vielgestaltigen Gefüges von Gusselien enthält der von den Verfassern herausgegebene Atlas Metallographicus<sup>[31]</sup>. Hier kann nur ein kurzer Überblick über das Gefüge von Grauguss gegeben werden.

#### Gefügebestandteile:

Perlit, Ferrit, Zementit, Graphit, Temperkohle, Ledeburit, Steinit, Carbide und Metallide, Schlackeneinschlüsse.

#### Gesamtanordnung:

Tannenbaumkristalle, heterogenes und entartetes Graphitentextilum in sehr mannigfachen Formen und Ausbildungen, kleine Einseln, *Headings*.

- 42 -

Einzelausbildung:

Graphit in mannigfacher Form und Grösse, Porlit in verschiedener Ausbildung, Sekundär-Graphit, Temperkohle, eutektisches Ferrit, Ledeburit, Steadit, Nitrid, Ferrocyanid, u.a. Schlackeneinschlüsse, insbesondere Mangan-Sulfid-Schlacke.

Das Gefügebild der verschiedenen Graugussarten (Maschinenguss verschiedener Art, Kokillenguss, Kunstguss u.a.) ist beträchtlich unterschieden. Man kann aus der Gefügebearbeitung ziemlich sichere Schlüsse auf die mechanischen Eigenschaften ziehen.

2. Gusshaut, Handschicht, Hauptschicht

Man unterscheidet an Gussstücken von aussen nach innen die Handschicht mit der Gusshaut, die Hauptschicht und bei dicken Stücken die Innenschicht. Die Gusshaut ist etwa 0,2 bis 0,5 mm dick. Die Handschicht beträgt 25% der Entfernung von der unbearbeiteten Oberfläche bis zur Mitte der Wand, mindestens aber 1 mm, höchstens 5 mm von der unbearbeiteten Oberfläche aus nach innen. Die Hauptschicht beträgt bis 15 mm von Ende der Handschicht aus nach innen. Unter Innenschicht versteht man bei dicken Stücken den unterhalb der Hauptschicht liegenden Teil. An Gleit- und Festsstellen werden durch Bearbeitung die Gusshaut und die Handschicht entfernt, so dass dort die Hauptschicht an der Oberfläche liegt. Für Abnahmezwecke entnimmt man die Schliffe zur metallographischen Untersuchung aus der Hauptschicht der Probestäbe. Die Schliffe sind dabei so zu nehmen, dass die Proben an den Stellen beobachtet werden, die dem massgebend beanspruchten Ort des Gussteiles entsprechen. Wollen der Hersteller oder der Verbraucher den Gefügezustand in den Gusstücken feststellen, so sind auch hier die Schliffe so zu entnehmen, dass sie die massgebend beanspruchten Stellen enthalten, z.B. bei Zylindern unmittelbar unter der Laufbahn.

- 43 -

### 3. Die Gleiteigenschaften

Seit jeher hat sich Grauguss als ein geeigneter Werkstoff für Lagerschalen erwiesen. Über die günstigste Graugussart für die Verwendung zu Lagerschalen waren die Meinungen geteilt. Angewandt wurde zuerst der früher allgemein erzeugte Grauguss mit Ferrit und Perlit als Grundmasse bei grober Graphitbildung. Versucht wurde auch die Einführung eines geglühten Guss-eisens, das nur aus Ferrit und Graphit bestand. A. Diefenthaler und <sup>[342]</sup> L. Sipp<sup>[342]</sup> von der Firma H. Iens, Mannheim, wiesen dann darauf hin, dass ein Grauguss ohne Ferrit, der nur aus Perlit, Graphit und Steadit aufgebaut ist, die besten Gleiteigenschaften habe. Die Vorzüge dieses sogenannten "Perlitgusses" als Lagermetall und überhaupt als verschleissfestes Guss-eisen sind jetzt allgemein anerkannt. Durch zahlreiche <sup>[33,34,35]</sup> Versuche<sup>[36]</sup> und nach langen technischen und Patent-Streitigkeiten<sup>[36]</sup> ist nun erwiesen, dass ein guter Lagergrauguss aus einer perlitischen, praktisch ferritfreien Grundmasse mit reichlich eingelagerten feinen Graphitblättchen bestehen soll. Solcher Grauguss enthält stets auch ein Steaditnetz. Auf diese Tatsache wird wenig hingewiesen! Perlitguss entsteht, wenn sich ein Grauguss mit niedrigem Siliziumgehalt von etwa 750° an so schnell abkühlt, dass die eutektoidische Graphitkristallisation unterbleibt und nur das metastabile Eutektoid  $\delta$ -Eisen-Zementit entsteht. Diese Abkühlungsweise verursacht zugleich eine ziemlich feine Perlitausbildung. Die Festigkeit und die guten Verschleiss- und Gleiteigenschaften des Perlitgusses beruhen vielleicht nicht nur auf der Abwesenheit von Ferrit, sondern auch auf der Dichteit und Feinkörnigkeit des Perlites.

Der Graphit ist wesentlich weicher als der Perlit und liegt deshalb immer etwas vertieft in der bearbeiteten Oberfläche. Er bildet Mikronuten für die Ölzufuhr im Lager, zugleich wirkt feinabgeschliffener

- 44 -

- Graphitstaub schmelzend. Durch besonders beschleunigte Abkühlung im Temperaturgebiet zwischen  $750^{\circ}$  und  $550^{\circ}$  kann man eine besonders feine Perlitausbildung bewirken. Solche Perlitform bezeichnet man als Sorbit. Sorbit scheint die beste Gefügeform für die Grundmasse des Zylindergusses zu sein. Eine Legierung mit Mn, Cr oder Ni fördert die Sorbitbildung. Eine ausführliche Darstellung über Grauguss für Zylinder gibt H. Reiningner. [37]

#### 4. Die Bearbeitbarkeit

Das wesentliche Merkmal des Graugusses ist die reichliche Einlagerung des weichen, bröckeligen Graphites. Denkt man sich einmal den Graphit fort, so dass der Grauguss nur aus seiner metallischen Grundmasse besteht, so wäre er gleich einem Sonderstahl mit etwa 2% Si, 0,5% Mn, 0,5% P, mit lamellaren Perlit, viel hartem Steadit und ziemlich viel harten Schlacken. Ein solcher Stahl wäre besonders schlecht bearbeitbar. Der Graphit aber macht diese Metallmasse bei der Bearbeitung bröcklig. Die Späne sind kurz und spritzig. Der Grauguss ist daher gut bearbeitbar, da die Metallmasse vor der Bearbeitungsschneide immer wieder kurz abbricht. Bestehen bleibt aber die Abnutzung der Schneide durch die Härte der metallischen Grundmasse. Deshalb sind die Standzeiten geringer als bei Bearbeitung von Stahl, gl. Abb. 3 und Abb. 4. Aus den beiden Bildern geht ferner hervor, dass die Zerreihsufertigkeit keine geeignete Bezugsgrösse für die Bearbeitbarkeit von Grauguss ist. Zutreffender ist die Beziehung auf die Härte, Abb. 4. Aber auch bei Zuordnung von Härte und Bearbeitbarkeit gibt es ziemlich starke Streuungen. Offensichtlich wird die Bearbeitbarkeit von der Verteilung des Graphites beeinflusst. Nach Untersuchung von A. Dallmann und H. Dabringhaus [38] erwies sich ein Schmelzguss trotz verhältnismässig hoher



- 45 -

Festigkeit und Erte als besonders gut bearbeitbar. Im Schleuderguss hat der Graphit viel feiner unterteilt als im Guss zusammen erstarrenden Kestenguss.

### 5. Der Verschleiss

Ein Mass für die oben erwähnte besondere Wirkung der Graphitverteilung gibt die sogenannte "lineare Graphitdurchsetzung" [39]. Zur Ermittlung dieser Grösse zählt man die von einem Hilfsliniennetz geschnittenen Graphiteinschlüsse bei 55facher Vergrösserung aus. Die lineare Graphitdurchsetzung gibt auch ein Mass für den Verschleiss, vgl. Abb. 5, aus der Brinellhärte dagegen kann man nicht auf den Verschleiss des Graugusses schliessen. Abb. 6 zeigt, dass der Verschleiss zwischen Brinellhärten von ca. 170 bis 350 kg/mm<sup>2</sup> praktisch unabhängig von der Härte ist. Am verschleissfestesten ist Perlitguss, Ferriteinlagerungen erhöhen den Verschleiss, Abb. 7. Das Silizium ruft eine Verringerung des Verschleisses bei rollender Reibung hervor, die aber erst bei höheren Siliziumgehalten beträchtlich ist. Steigende Manganmengen im Gusseisen erhöhen die Verschleissfestigkeit, vgl. Abb. 8. Auch der Mangangehalt verringert in den üblichen Prozentsätzen den Verschleiss. Ebenso macht auch der Schwefel den Grauguss verschleissfester.

### 6. Die Korrosion

Gemessen gegen die Normalkalomel-Elektrode in 2%iger Kochsalzlösung [42] hat Eisen ein Potential von + 0,755 V, Graphit von + 0,372 V. Der Graphit hat also gegen die Eisengrundmasse eine Potentialdifferenz von etwa 1 V! Nach der elektrochemischen Korrosionstheorie müsste man eine sehr beträchtliche Korrosion für Grauguss erwarten. In der Tat löst sich in verdünnter Säure Grauguss viel schneller als Stahl, und man muss annehmen, dass auf einer Graugussfläche bei ihrer Beleuchtung sofort eine Korrosion durch die Lokal-



- 46 -

ströme zwischen Graphit und Eisen eingeleitet wird. Aber eine merkliche Korrosion kommt erst zustande, wenn solche Lokalströme andauern. Den elektrolytischen Strömen wirkt alsbald die DPolarisation entgegen. Die kathodische Polarisation kommt zustande durch den auf der Kathode abgeschiedenen elementaren Wasserstoff. Der atomare Wasserstoff haftet hier mit einer "Überspannung", deren Höhe von der Natur der Kathode abhängt. Er unterbricht den Lokalstrom. Gerade der Graphit ergibt mit Wasserstoff eine bedeutende "Überspannung" [43]. Manu kommt, dass die Verschiedenheit der "Bellftung" beim Rosten des Eisens das wesentliche Moment ist, das in seiner Wirkung die Tätigkeit der Gefügelokalelemente übertrifft. Unlegierter Grauguss ist daher von verdünnten Säuren leicht angreifbar, dagegen ist er bemerkenswert widerstandsfähig gegen Rostangriff. Gusseiserne Wasser- und Gasrohre, im Boden verlegt, tun ihren Dienst seit vielen Jahrzehnten. Man hat ohne neue Dachbauweise unter Verwendung gusseiserner Dachplatten entwickelt [44]. In der Provinz Derby in England sind im Jahre 1927 über 500 gusseiserne Häuser aus genormten Gussplatten errichtet worden [45]. Seit altersher wird Grauguss als bevorzugter und haltbarer Werkstoff im Maschinenbau angewandt. Man braucht daher im Motorenbau unter üblichen Bedingungen die Korrosion von Grauguss ebenso wenig zu fürchten wie die von Stahl.

### III. Leichtmetalle

#### 1. Aluminiumlegierungen

##### a. Der Gefügebau

Auch der Gefügebau der Aluminiumlegierungen ist von den Verfassern für den Atlas Metallographicus ausführlich bearbeitet worden. Infolge des Krieges konnte aber erst ein Teil dieses Atlasbandes veröffentlicht werden [46]. Die folgende Übersicht gründet

- 47 -

sich in der Hauptsache auf bisher unveröffentlichte Untersuchungen.

Gefügebestandteile:

In Reinaluminium:

Aluminiummischkristall ( $\alpha$  = Mischkristall) als Grundmasse mit eisen- und siliziumhaltigen Aluminiden in geringen Mengen.

In Aluminiumlegierungen:

Aluminiummischkristall ( $\alpha$  = Mischkristall) als Grundmasse mit Silizium, ternären und Lehrstoffaluminiden, dem Magnesiumsilizid  $Mg_2Si$  und Silizium.

Metallide in den Legierungsarten:

Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mn:

Kupferhaltige, eisen-, silizium-, manganhaltige, binäre und Lehrstoffaluminide,  $Mg_2Si$  und Silizium.

Al-Cu-Ni

wie oben und nickelhaltige Aluminide.

Al-Mg-Si, Al-Mn, Al-Mg-Mn, Al-Mn:

eisen-, silizium-, mangan-, magnesiumhaltige Aluminide,  $Mg_2Si$  und Silizium.

Al-Si (Al-Si-Mg, Al-Si-Cu):

überwiegend Silizium, eisen-, silizium-, manganhaltige Aluminide,  $Mg_2Si$ , (kupferhaltiges Aluminid)

Lagerlegierungen:

Al-Fe

überwiegend eisenhaltige Aluminide

Al-Fe-Mn

überwiegend eisenhaltige und manganhaltige Aluminide.

Automatenlegierungen:

Metallide wie oben und Sil.

Gesamtanordnung:

- 48 -

Gusslegierungen:

Tannenbauartförmig, grobkörnige Aluminiummischkristalle ( $\alpha$  = Mischkristalle) mit den Aluminiden, ausserdem  $Mg_2Si$  und Silizium als binär-, ternär- oder quaternäreutektische, teilweise peritektische Bestandteile und als Ausscheidungen. Gefügeausbildung im Sandguss gröber, im Kokillenguss feiner und besonders feinkörnig im Spritzguss auf veredeltem Silumin.

Press- und Walzlegierungen:

Gussgefüge zerstört, Metallide körnig und zellig angeordnet (Metallidzellen). Körnung des Aluminiummischkristalles der Grundmasse polygonal oder meist gestreckt. Oberfläche häufig mit kupferfreier Legierung plattiert.

Einzelausbildung:

Die Grundmasse entsteht bei langsam gekühlten oder geglähten Legierungen als kleinste Metallideinschlüsse als Ausscheidungen. In veredelten (vergüteten), Legierungen, auch im Zustand der Kaltverfestigung, ist die Grundmasse an Ausscheidungen verarmt.

Kaltgewalzt ist das Korn des Aluminiummischkristalles ( $\alpha$  = Mischkristall) gestreckt und mit Gleitlinien durchsetzt.

b. Die Korrosion

Das Aluminium ist ein stark elektronegatives Metall. Es vermag Wasser unter Wasserstoffentwicklung stürmisch zu zersetzen, jedoch überzieht sich die Aluminiumoberfläche an der Luft und im Wasser sogleich mit einer dichtabschliessenden Haut aus Aluminiumoxyd. Dadurch hemmt die Korrosion so vollkommen, dass das Aluminium luft- und wasserbeständig ist und auch von vielen schwächeren organischen Säuren nicht angegriffen wird. Es ist daher ein geeigneter Werkstoff für Küchengeräte. Seine Korrosionsfestigkeit ist so gut, dass man das Eisen durch Plattierung mit Aluminium gegen Rost schützen könnte, falls solche Plattierung technisch

- 49 -

ausführbar für . . . beständigsten gegen Korrosionsangriffe ist Aluminium. Die heterogenen Gefügebestandteile der Legierungen vermindern die Korrosionsfestigkeit beträchtlich, insbesondere macht ein Kupfergehalt das Aluminium korrosionsanfällig, da das in den Aluminium-Kupfer-Legierungen enthaltene Metallid  $Al_2Cu$  gegenüber dem Aluminium elektropositiv ist. Deshalb verwendet man kupferfreie Aluminiumlegierungen, wenn es auf eine Korrosionsfestigkeit ankommt, oder plattiert die kupferhaltigen Legierungen mit Reinaluminium.

#### c. Der Verschleiss

Genaue Werte über die Verschleissfestigkeit - mit Ausnahme von Lagerlegierungen - liegen nicht vor. Hohe Verschleissbeanspruchung lässt ungeschütztes Aluminium nicht zu. Es ist wesentlich weicher und abnutzbarer als Stahl, Messing und Kupferlegierungen.

#### d. Die Reibeigenschaften

Aluminium galt bis vor wenigen Jahren für ungeeignet zur Verwendung als Lagermetall. Neuerdings hat man gefunden, dass ein hoher Eisengehalt das Aluminium auch als Lagermetall geeignet macht. Man verwendet Prozentsätze bis zu 6% Eisen, während bekanntlich die Aluminium-Legierungen zur Vermeidung von Sprödigkeit und Korrosion möglichst eisenfrei sein sollen. Das Eisen, bei allen übrigen Aluminiumlegierungen mit Recht als Schädling angesehen, verleiht den Aluminium-Lager-Legierungen eine ausreichende Gleitfähigkeit. Weitere Angaben über die Bewährung der Aluminiumlegierungen als Lagermetall und ihre Eigenschaften bei Grenzreibungen und Verschleissreibung enthält Abschnitt "Lagermetalle", Unterabschnitt "Die Reibeigenschaften" auf Seite 52/53.

#### Die Bearbeitbarkeit [47,48,49,50,51]

Aluminium ist bei geringem Kraftbedarf gut bearbeitbar mit lockigem Span. Ein Zusatz von Blei (Magnesium,

- 50 -

Wismut) macht den Span kurz und spritzig, so dass Legierungen von Aluminium mit diesen Metallen auch auf Automatenmaschinen für Bohr- und Drehteile verwendet werden können. Um die gute Bearbeitbarkeit voll auszunutzen, muss man mit grossen Drehzahlen und grossem Vorschuss unter Verwendung kräftiger, starrer Werkzeugmaschinen mit schwingungsfreier Lagerung arbeiten. Auch müssen Sonderwerkzeuge mit gerundeten, geschliffenen Span-Ruten und geeigneten Keil- und Spanwinkeln angewandt werden. Bei solchem intensiven Arbeiten werden die Schneiden der Werkzeuge durch die harten Einlagerungen der Aluminiumlegierungen angegriffen. Man muss also beste Schnellarbeitsstähle und Werkzeuge mit Hartmetall verwenden. Eingehende Angaben über die Form und Art der Schneidwerkzeuge enthält das Aluminium-Taschenbuch. [52]

## 2. Magnesiumlegierungen

### a. Der Gefügezustand

#### Gefügebestandteile

Magnesiummischkristall ( $\alpha$  = Mischkristall) als Grundmasse, Metallide  $Al_2Mg_4$ ,  $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $Mg_2Si$ ,  $Mg_2Ge$ , Langan, Eisen

#### Gesamtanordnung:

#### Gusslegierungen:

Tannenbaumgefüge, primäre Magnesiummischkristalle ( $\alpha$  = Mischkristall) mit den Metalliden als eutektischen Einlagerungen.

#### Knetlegierungen:

Gussgefüge zerstört, Metallide zellig angeordnet (Metallidzeilen)

#### Einzel Ausbildung:

Die Grundmasse enthält streifige und körnige Metallidausscheidungen. Die Körnung wird bei den Mg-Zn-Legierungen durch Gusszusatz sehr fein. Eisenabschlüsse als kleine Körner.

b. Magnesium kristallisiert hexagonal

Eisen, Kupfer und Aluminium kristallisieren regulär. Das Magnesium aber ist hexagonal. Diese anisotrope Kristallform bewirkt eine Anisotropie der Verformung bei der Streckung. Wie es sich nicht nur am Einkristall, sondern auch bei den aus vielen Kristallen aufgebauten Werkstoffen. Deren einzelne Kristalllängen sich bei Streckung zunächst verschleichen, und erst bei grosser Streckung beginnt eine gleichmässige Dehnung; während Aluminiumstäbe bereits von 0,01 % bleibender Dehnung an gleichmässig fliesen, ist die Längung von Magnesiumstäben ungleichmässig, bis die bleibende Dehnung etwa 0,1 % überschreitet. Die bei hohen einseitigen Streckgraden eintretende Gefügeregelung macht sich bei dem hexagonalen Magnesium stärker bemerkbar als bei den regulären Metallen. Magnesium-Pressstücke zeigen deutliche Unterschiede ihrer zug- und druckelastischen Eigenschaften. Normal gepresste Elektronengläser haben bei Zugbeanspruchung eine Streckgrenze von 20 bis 22 kg/mm<sup>2</sup>, während ihre Quetschgrenze schon bei 12 bis 14 kg/mm<sup>2</sup> liegt.

c. Das spezifische Gewicht

Das Magnesium hat von allen Konstruktionsmetallen das geringste spezifische Gewicht. Das spezifische Gewicht beträgt nur  $\approx 1,7$ , gegenüber  $\approx 2,7$  bei Aluminium und  $\approx 7,8$  Eisen. Werkstücke aus Magnesium lassen sich noch bei 1/3 von Stahl auf den Werkzeugmaschinen einbringen, während nur gleichgrosse Stücke aus Stahl mit einem Drittel des Gewichtes bewogen muss. Das geringe Gewicht des Magnesiums bei seiner Festigkeit, die für manche Zwecke ausreicht, empfiehlt seine Anwendung für bewegte Konstruktionsteile, insbesondere in der Luftfahrt, im Schienen- und Verkehrswesen, weil dadurch tote Last eingespart werden kann.



- 52 -

d. Die Bearbeitbarkeit

Bei Magnesium kann die höchste Schnittleistung unter allen metallischen Werkstoffen erzielt werden, da es die geringsten Schnittdrücke beansprucht. Die wirtschaftliche Ausnutzung dieses Vorzuges ist nur bei Massenerstellung möglich, Sie verlangt Werkzeugmaschinen hoher Leistungsfähigkeit und besondere Schneidwerkzeuge, ähnlich wie dies auch für Aluminium gilt (vgl. Abschnitt "Aluminiumlegierungen" Unterabschnitt "Die Bearbeitbarkeit" Seite <sup>44</sup>52, 2.3.1.5.).

e. Die thermischen Eigenschaften

Bei gleicher Wärmezufuhr dehnt sich das Magnesium fast fünfmal so viel aus wie Eisen, vgl. Zahlentafel 3. Diese Verhältniszahl wird sich nicht voll auswirken, da die Wärmeabfuhr im Magnesium etwa viermal so schnell vor sich geht wie im Eisen. Aber auch bei gleicher Erwärmung ist die Ausdehnung des Magnesiums doppelt so gross wie die des Eisens. Konstruktionsteile aus Eisen und Magnesium, die einer Erwärmung ausgesetzt sind, (z.B. Lagerschalen) sollen daher nicht fest verbunden sein, dann würde das Magnesium gestaucht werden und eine Formänderung erleiden. Die Magnesiumteile sollen sich ungehindert vom Eisen ausdehnen und zusammenziehen können.

- 55 -

Zahlentafel 13Thermische Eigenschaften und spez. Gewichte  
von Mg, Al und Fe.

	Mg	Al	Fe
1. Spez. Gewicht $\text{g/cm}^3$	1,74	2,70	7,86
2. Spez. Wärme $\text{cal/g } ^\circ\text{C}$	0,24	0,22	0,115
3. Isovolumetrische Erwärmung $^\circ\text{C cal/g cm}^3$	2,5	1,7	1,1
4. <sup>leit</sup> Wärmefähigkeit $^\circ\text{C cal/cm s}$	0,40	0,52	0,11
5. Wärmeausdehnungszahl $\text{mm/m } ^\circ\text{C}$	0,025	0,024	0,012
6. Wärmeausdehnung bei gleicher Wärmezufuhr $\text{cal mm/m}$	0,06	0,04	0,013

- 54 -

f. Reibeigenschaften.

Über gleitende Reibung und Verschleiss des Magnesiums liegen noch wenig Messungen vor. Das im Abschnitt "Die Reibeigenschaften" Seite 49, für Aluminium gesagte wird im wesentlichen auch für Magnesiumlegierungen gelten. Hochwertige Lagermetalle aus Magnesium als Hauptbestandteil sind bisher nicht bekannt geworden. Jedoch sind die Gleiteigenschaften bei gering belasteten Flächen, z.B. bei Zylinderbahnen, wie die Erfahrung gezeigt hat, ausgezeichnet.

IV. Bronze, Messing und Rotguss

Bevor die Menschen gelernt hatten, Eisen herzustellen, waren Bronze und Rotguss die einzigen Gebrauchsmetalle. Die Funde aus jener uralten Bronzezeit vor etwa 3000 Jahren lassen jene Eigenschaften der Bronzen erkennen, die auch heute noch ihr wesentlicher Vorzug sind, nämlich ihre Korrosionsfestigkeit. Diese Bronzewaffen und -geräte aus vorgeschichtlichen Funden sind mit einer dichten Patina bedeckt, und viele haben ihren Metallkern bewahrt. Die um viele Jahrhunderte jüngeren Eisenwaffen und -geräte aus frühgeschichtlichen Grabstellen sind fast alle längst völlig durchgerostet. Einige sind als Oxidkörper erhalten, die meisten aber sind gänzlich gelöst und fast spurlos vergangen. Nur wenige, die trocken ohne Luftzutritt lagerten, sind als Metall erhalten geblieben. Als bevorzugtes Metall wird auch heute Bronze im Schiffs- und Schiffsmaschinenbau angewendet, weil ungeschütztes Eisen in Seewasser und Seeluft schnell korrodiert. Auch wird Stahl für diese Verwendungszwecke mit Bronze oder Messing plattiert. Im allgemeinen Maschinenbau verwendet man Kupferlegierungen wegen ihrer guten Reibeigenschaften als Lagermetall. Wegen der guten Korrosionsbeständigkeit gebraucht man sie für Rohre und Armaturen an Wasser- und Ölleitungen und dergl.

Die Gefügebestandteile der Kupferlegierungen sind in Tafel 1 genannt. Über die Reibeigenschaften wird ein Abschnitt "Lagermetalle", Seite 55 und folg. eingehend berichtet. Die Kupferlegierungen sind sehr gut bearbeitbar. Sie sind thermisch nicht härtbar, sondern nur durch Kaltreckung. Ihre Härte und Schneidhaltigkeit ist der des gehärteten Stahles durchaus unterlegen. Auch hinsichtlich Festigkeit und Streckgrenze kommen sie den vergüteten Sonderstählen nicht gleich. Hervorragend ist jedoch die Zähigkeit einiger Bronzen. Ebenso wie zäher Nickelstahl schnürt sich auch eine Maschinenbronze beim Barreissversuch nicht nur an einer Stelle, sondern an vielen Stellen über die ganze Länge des Probestabes ein, bis sie endlich reißt.

## V. Lagermetalle

### 1. Der Gefügebau

Die Gefügebestandteile sind bereits in Tafel 1 aufgeführt. Über das Gefüge von Grauguss gibt der Abschnitt "Grauguss" Unterabschnitt "Der Gefügebau", Seite 44/45, Auskunft. Im Abschnitt "Der Gefügebau der Lagermetalle" ist bereits über das Gesamtgefüge berichtet.

#### a. Weißmetalle

Das Weißmetall umfasst den weiten Legierungsbereich von ca. 80 % Sn, 10 % Sb, 10 % Cu bis ca. 5 bis 10 % Sn, 15 % Sb, 2 % Cu, 80 % Pb. Man verwendete vor den Kriegen Lagerweißmetalle mit Zinngehalten von etwa 10, 20, 40, 60, 70 und 80 % Sn. Das teurere Zinn war also in den verschiedenen Graden durch das billigere Blei ersetzt. Dabei hatte man zunächst die Meinung, dass die Güte der Weißmetalle etwa dem Zinngehalt proportional wäre. Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Meinung irrt. Das beste und alle anderen Weißmetallarten deutlich übertreffende Weißmetall ist die bleifrei, nur aus Zinn, Antimon und Kupfer bestehende

- 56 -

bestehende Legierung. Sobald mehr als ca. 0,2 % Blei zugegeben ist, wird die Härte beträchtlich vermindert. Es macht für die Reib Eigenschaften nicht viel Unterschied, ob ein Reibmetall 10 % oder 80 % Blei enthält. In den hochzinnehaltigen Legierungen ist das Blei als feine eutektoidische Einlagerung enthalten. Die Kupfer- und antimonhaltige Grundmasse ist wesentlich härter als Blei. Hier tritt dann der Fall vor, dass in einer härteren Grundmasse kleine weiche Einlagerungen eingebettet sind. Die Bleieinschlüsse hängen nicht zusammen, bilden also keine Ölnut. Sie befördern nicht die Schmierung, unterbrechen aber das auf dem Zinn haftende Epilamen an sehr vielen Stellen.

b. Zinn-bronze und Rotguss

Die gegossenen Lagermetalle aus Bronze und Rotguss sind infolge der Kristallneigung aus weichen Achsstreifen der Kristalle und harten Restfeldern aufgebaut. Diese Anordnung ergibt die für Lagermetall gewünschte Lagerbeschaffenheit. Bei Zinnlegierungen beim Glühen werden die Härteunterschiede zwischen den Achsstreifen und Restfeldern der Kristalle aufgehoben. Man soll also gegossene Bronze- und Rotguss-Lagermetalle ungeglüht verwenden.

c. Bleibronze

Tannenbaumkristalle bilden bei Bleibronze die härteren Einlagerungen, während die weichere Grundmasse aus Blei besteht. Ein Zusatz von etwas Zinn (1 bis 2 %) oder Antimon ist zur Erhöhung der Härte des Kupfers notwendig. Selbst kleine Eisen- und Schwefelgehalte gelten als schädlich. Grössere Bleianhäufungen ~~xxxxxxx~~ müssen vermieden werden. Das Blei-Kupfer-Monotektikum hat in hohem Masse die Neigung, zu entarten. Es bildet also keineswegs das von der Theorie geforderte feinkörnige gleichmässige Gefüge, sondern das Kupfer und das Blei kristallisieren jedes für sich besonders in grösseren Partien. Die früher

zunächst angewandte monotektische Legierung mit etwa 35 % Blei hat sich wegen der grossen Bleiabsonderung als ungeeignet erwiesen. Man verwendet stark untermonotektische Legierungen mit 18 bis 20 % Blei. Bei diesen geringen Bleigehalten kann durch geeignete Erstarrungsbedingungen die Bleiabsonderung vermieden werden. In Ermangelung anderer schnell ausführbarer Prüfungsverfahren geschieht die Abbindeprüfung der Bleibronzen erst auf Grund von Röntgenaufnahmen. Auf den Röntgenfilmen erscheint das Blei heller, das Kupfer dunkler. Ein Metall gilt als gut, wenn es die hellen und dunklen Stellen in ganz gleichmässiger feiner Verteilung zeigt. Dabei kann man aber kleine Hohlräume nicht sicher von Kupfereinschlüssen unterscheiden, und es ist nicht ausgemacht, ob die ganz feine gleichmässige Verteilung der Legierungsbestandteile für die Reibeigenschaften wirklich von ausschlaggebender Bedeutung ist.

d. Sintermetalle

In den letzten Jahren ist mit grossem Erfolge das ölgetränkte Sinter Eisen als Lagermetall eingeführt worden. Das Gefüge besteht nur aus homogenen Eiseinkristallen, ist jedoch überall von Hohlräumen durchzogen. Diese Sintern Hohlräume bilden eine zusammenhängende Aderung durch das ganze Metall. Da das Aderwerk mit Öl gefüllt ist und die Öltränkung im Betriebe nachgefüllt werden kann, so bildet sie eine nie versagende Schmierung. Das Spielraum auf der den Hauptsteil der Reibbahn bildenden Eisenfläche bleibt auch bei mangelhafter Wartung des Lagers erhalten.

2. Die Reibeigenschaften

Die folgende Beurteilung der Laufeigenschaften folgt wiederum den Versuchen und Auffassungen von H. Lüpfer.<sup>[22]</sup>



- 58 -

Die Grenzschmierleisteigenschaften der Bronzen (Zinnbronze und Bleibronze) zeigen eine mittlere Höhe. Zinnbronze (G. Bz. 10) erträgt dabei eine Belastung von ca.  $160 \text{ kg/cm}^2$ , Bleibronze von ca.  $200 \text{ kg/cm}^2$ . Bei Verschleißreibung ist Zinnbronze noch mit etwa  $5/\text{kg cm}^2$ , Bleibronze sogar mit  $10/\text{kg cm}^2$  belastet. Die Bronzen gehören zu den Lagermetallen, bei denen der Verschleiß nicht plötzlich einsetzt, sondern bei denen sich das beginnende Versagen durch allmähliches Grösserwerden des Lagerspieles ankündigt, ohne stets sogleich zu völligen Unbrauchbarwerden des Lagers zu führen.

Guß Eisen kommt hinsichtlich der Grenzreibung den Bronzen nicht ganz gleich, bei Verschleißreibung dagegen erreicht Perlitgußeisen sogar die Belastungswerte von Bleibronze.

Die Aluminiumlegierungen zeigen bei Grenzreibung die überraschend hohe Belastung von ca.  $150 \text{ kg/cm}^2$ , dagegen versagen sie bald bei Verschleißreibung. Sie sind also in Lagern mit mangelhafter Schmierung nicht am Platze.

Das Weißmetall kommt bei Grenzschmierung den Bronzen fast gleich, bei Verschleißreibung übertrifft es mit einer Belastbarkeit von ca. 20 kg. alle übrigen bisher genannten Lagermetalle. Insbesondere ist das bleifreie Weißmetall bei Verschleißreibung sowohl dem Grauguß als auch den Bronzen überlegen, während die hochbleihaltigen Weißmetalle plötzlich stark verschleissen, sobald ein Fressen begonnen hat.

Die ölhaltigen Sintermetalle dürfen bei Grenzreibung nicht über ca.  $30 \text{ kg/cm}^2$  belastet werden, ertragen jedoch eine Verschleißreibung mit ebenfalls ca.  $30 \text{ kg/cm}^2$  Belastung. Hinsichtlich des sogenannten Motlaufes, also bei vorzüglicher Ölzufuhr, sind demnach die ölhaltigen Sintermetalle allen übrigen Lagerwerkstoffen überlegen. Sie sind daher für die Anwendung

- 59 -

im Feinmaschinenbau mit seinen meist ungepflegten Lagern besonders geeignet. Für die Zwecke des mittleren Maschinenbauers sind die Laufeigenschaften von Weißmetall, Bronze und Gabelisen ausreichend, während die Aluminiumlegierungen nur dann unbedenklich angewandt werden können, wenn für einwandfreie Schmierung stets sicher gesorgt werden kann.

- 50 -

Tabelle 1.Gefügebestandteile einiger im Motorenbau angewandter Metalle:

(Stahl, Sonderstahl, Gussguß, Hartguß, Temperguß, Rotguß, Bronze, V. roudguß, Leichtmetalle, Weißmetalle)

Metall:	Grundzustand:	Einlagerung:
<u>Kohlenstoff-</u> <u>Stahl:</u>		
geschmiedet.....	Ferrit, Korngestalt polykristallin	Perlit
weichgeglüht.....	des. l.	körniger Zementit
gehärtet.....	Martensit	Einlagerungen fehlen im untereutektoischen Stahl: Zementit und Austenit
vergütet.....	Ferrit, Korngestalt zackig	sehr feinkörniger Zementit
kalt gereckt.....	Ferrit, Körnung gestreckt	Perlit oder Zementit
<u>Sonderstahl:</u>		
geschmiedet .....	Ferrit	Karbitperlit, Troostit oder Sorbit, Hardenit
weichgeglüht.....	Ferrit	körniges Karbid
gehärtet.....	Martensit	Einlagerungen fehlen im untereutektoischen Stahl. Im übereutektoischen Stahl: Sonderkarbid, Austenit
vergütet.....	Ferrit	feinkörniges Sonderkarbid

<u>Metall:</u>	- Grauguss:	Einlagerung:
<hr/>		
<u>Ledeburitisches Sonderstähle:</u>		
geschmiedet....	Ferrit	Sonderkarbide, Karbid- perlit
weichgeglüht...	Ferrit	körnige Sonderkarbide
gehärtet.....	Martensit, Austenit	körnige Sonderkarbide
gehärtet und... angelassen		grössere Sonderkarbide, hochdisperse Ausscheidun- gen
<hr/>		
<u>Aushärtbare Son- derstähle:</u>		
geglüht.....	Ferrit	Karbidperlit
gehärtet und <i>angelassen</i>	Ferrit	Karbide, $Fe_3C$ , $Fe_3W_2$ , u.a.
<hr/>		
<u>Austentische Stähle</u>	Austenit	ohne und mit $PbC$ , $MoC$ , $TaC$
<hr/>		
<u>Grauguss:</u>	Perlit mit oder ohne Ferrit	Graphit, Stendit, $PbC$ , $TiN$ u.a.
<hr/>		
<u>Hartguss:</u>	- Perlit	Karbid als Eutektikum
<hr/>		
<u>Temperguss:</u>	Ferrit oder Perlit und Perlit	Temperkohle
<hr/>		
<u>Rotguss:</u>	X - Kupfer- kristall	$Cu_{31}Sn_8$ (Bronzit), Blei

Metall:	Grundmasse:	Einlagerung:
<u>Bronze:</u>	$\alpha$ -Kupfermischkristall	ohne oder mit $\text{Cu}_3\text{Sn}_8$
<u>Verbundmetall:</u> <u>Stahl:</u>	Ferrit	Perlit
<u>Bleibronze:</u>	$\alpha$ -Kupfermischkristall	Blei
<u>Leichtmetall:</u> Aluminiumlegierung	$\alpha$ -Aluminiummischkristall	Aluminide mit Cu, Mn, Mg, Fe, Si, Ni. $\text{Mg}_2\text{Si}$ , Si je nach Legierung
<u>Elektron:</u>	Magnesiummischkristall	$\text{Al}_2\text{Mg}_3$ , Mn, $\text{Mg}_2\text{Si}$ je nach Legierung
<u>Weißmetall:</u> hochbleihaltig	Bleimischkristall	Antimon, SbSn, $\text{Cu}_2\text{Sb}$ , $\text{CaPb}_3$
hochzinnhaltig	Zinngrundmasse	SbSn, $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$

[illegible][illegible][illegible]



Schriftumsverzeichnis

zum Bericht Nr. 312, them. Kennziffer IV/-a

"Über die Beziehungen zwischen der Beschaffenheit  
der Oberfläche von Konstruktionsteilen eines Motors  
und dem Verhalten im Betriebe."

Verfasser: Prof. Dr.-Ing. H. Hanemann u.  
Dr.-Ing. A. Schrader.

- 
- [1] M. Fink: Neue Ergebnisse auf dem Gebiete der Verschleißforderung. Diss. Techn. Hochschule Berlin 1929.  
Ders.: Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens  
Heft 20 vom 15. Oktober 1929.
  - [2] M. Fink und U. Hofmann:  
Z. anorgan. Chemie Bd. 210 (1933) S. 100/04.
  - [3] M. Fink und U. Hofmann:  
Z. Metallkde. Bd. 24 (1932) S. 50/54.
  - [4] M. Fink und U. Hofmann:  
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 6 (1932/33) S. 161/64.
  - [5] H. J. Wiester:  
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 9 (1936) S. 525/27.
  - [6] B. P. Haigh und B. Jones:  
J. Inst. Met. Bd. 43 (1930 I) S. 271.
  - [7] E. Siebel und G. Stähli:  
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 15 (1941/42) S. 519/27.
  - [8] R. Glocker:  
Schr. Dtsch. Akad. Luftfahrtforsch. Nr. 52 (1942/43)  
S. 1/14.
  - [9] H. Hanemann und F. Schulz:  
Z. Metallk. Bd. 33 (1941) S. 124/34.
  - [10] N. A. Shishakow und V. J. Kasatochkin:  
C. R. (Doklady) Acad. Sci. U.R.S.S. Bd. 20 (1938)  
S. 277 (N.S.6).
  - [11] H. Hanemann und A. Schrader:  
Atlas Metallographicus III. Berlin 1941, Gebr.  
Bornträger, S. 58/59
  - [12] W. Ruttmann:  
Techn. Mitt. Krupp Bd. 4 (1936) S. 89.
  - [13] H. Möller und A. Rott:  
Mitt. K. W.-Inst. Eisenforsch. Bd. 19 (1937) S. 61/63.

- [14] G. Thomassen und B. H. Mc. Cutocheon:  
Mech. Engng. Bd. 56 (1934) S. 155/57.
- [15] A. Thura und L. Debus:  
Mitt. Mat.-Prüf.-Inst. T. H. Darmstadt Heft 7.  
Berlin 1936, VDI-Verlag.
- [16] H. Wiegand:  
Diss. T. H. Darmstadt 1933.
- [17] W. Staedel:  
Mitt. Mat.-Prüf.-Inst. T. H. Darmstadt Heft 4.  
Berlin 1933, VDI-Verlag.
- [18] F. Rapatz:  
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 3 (1929/30) S. 717.
- [19] E. Brödner, Herstellung und Werkstatt,  
Berlin 1934, VDI-Verlag.
- [20] G. Schmaltz, Technische Oberflächenkunde,  
Berlin 1936, Springer-Verlag.
- [21] Hans Moll: Superfinis - Feinziehschleifen,  
Schleif- u. Poliertechnik Bd. 18 (1941) S. 210.
- [22] H. Lüpfer: Die Reibungseigenschaften der Gleit-  
lagermetalle an Maschinen der Feinmechanik.  
VDI-Forschungen. 417, Berlin 1942, VDI-Verlag.  
Anhang in Z. VDI Bd. 87 (1943) S. 266.
- [23] E. H. Kachner: Schmierstoffe und Maschinenschmierung,  
2. Aufl. Berlin 1941, Gebr. Borntraeger.
- [24] Beech, Gierens und Smith: On Mechanism of Boundary  
Lubrication. Proc. Roy. Soc. Lond. Bd. 177 (1940)  
S. 90/117.
- [25] K.L. Wolf: Molekulare Physikalische Probleme in der  
Schmierung. Chem. Z. Die Chemie Bd. 55 (1942)  
S. 295/98.
- [26] H. Donandt: Über den Stand unserer Kenntnisse in der  
Frage der Grenzschmierung.  
Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 821/24
- [27] H. Hanemann und A. Schrader:  
Atlas Metallographie Band I, Berlin 1933, Gebr.  
Borntraeger.
- [28] O. Heckler und A. Hanemann:  
Z. Metallkde. Bd. 30 (1938) S. 410/16.
- [29] H. Diergarten:  
Metallwirtschaft Bd. 17 (1938) S. 1328/38.  
Ders.: Gefügerichtlinien im Dienste der Werkstoff-  
prüfung. Berlin 1940, VDI-Verlag.
- [30] F. Rapatz:  
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 3 (1929/30) S. 717
- [31] H. Hanemann und A. Schrader:  
Atlas Metallographie Bd. II. Berlin 1936, Gebr.  
Borntraeger.

- 6 -
- [32] A. Diefenthal und X Sipp:  
Stahl und Eisen Bd. 40 (1920) S. 1141.
  - [33] H. Schmalitz:  
Diss. T.H. Aachen 1936.
  - [34] R. Kimmel:  
Giesserei Bd. 11 (1934) S. 211, 493, 563, 573.
  - [35] R. Kimmel:  
Stahl und Eisen Bd. 42 (1925) S. 1461.
  - [36] D.R.P. 301 913 v. 10.5.1916,  
D.R.P. 325 250 v. 15.10.1918.
  - [37] A. Reiningers:  
Automobiltechn. Z. Bd. 37 (1934) S. 441/53.
  - [38] A. Wallich und H. Dabringhaus:  
Giesserei Bd. 17 (1930) S. 1169/77 und S. 1157/201.
  - [39] A. Wallich und J. Greger:  
Giesserei Bd. 20 (1933) S. 517 und 548.
  - [40] F. Heibach und E. Piwowarsky:  
Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 6 (1932/33) S. 501.
  - [41] E. Scharfberg:  
Giesserei Bd. 19 (1932) S. 145.
  - [42] O. Bauer:  
Gas- und Wasserföhr. Bd. 68 (1925) S. 704.
  - [43] A. Thiel und H. Stiel:  
Korrosion und Metallschutz Bd. 4 (1928) S. 148.
  - [44] Iron Age Bd. 75 (1935) Nr. 11 D. 10.
  - [45] E. Piwowarsky: Hochdruck-Gußeisen,  
Berlin, 1942, Springer-Verlag, S. 649.
  - [46] H. Hanemann und A. Schrader:  
Atlas Metallographie Bd. III, 1. Berlin 1941,  
Ver. Borntraeger.
  - [47] Hermann Zierbrock:  
Die Bearbeitung des Aluminiums.  
Leipzig 1935, Carl. Verlagsge.
  - [48] F. Kulpmann: Zum Schleifen und Polieren von Leicht-  
metall, Oberflächentechnik Bd. 18 (1941) S. 156.
  - [49] Paul Feldmann: Handbuch des Schleifers,  
3. Aufl. Leipzig 1942, Jénicke.
  - [50] Herwart Opitz und Wilhelm Zimmermann:  
Die Zerspanbarkeit der Automaten-Leichtmetall-  
legierungen Z. Metallz. Bd. 29 (1937) S. 296/300.

- 66 -

- [51] H. Schallbreck, R. Wallichs und H. Bethmann:  
Einfluss der Schneidflüssigkeit auf die Zerspanung  
von Leichtmetallen.  
Z. Metallk. 86. 29 (1937) S. 301.
- [52] Aluminium-Taschenbuch, herausgegeben von M. Haas,  
9. Aufl. Berlin 1942, Verlag der Aluminium-  
Zentrale G.m.b.H., S. 258 u.f.

Abb. 1: Innere Spannungen in der Grensschicht gedrehter Körper nach V. Kuttmann; Technische Mitt.Krupp Bd. 4 (1935) S.89, Masch.-Bau Betrieb Bd.15 (1936) S.557.

1: Bearbeitung: "Schnell" gedreht ohne Kühlung

2: Bearbeitung: "Langsam" gedreht mit Kühlung

3: Bearbeitung: "Schnell" gedreht mit Kühlung

x: Tiefe der Randzone

y: Spannungen

### Eigenschaften von Stahl I und II

	Stahl I	Stahl II		Stahl I	Stahl II	
C	0,15	0,30	Wärmebehandlung	1/4 h 1050°C Luft	1/4 h 850°C Luft	
Si	0,51	0,21				
Mn	0,39	0,52				
P	0,018	0,018	Streckgrenze	kg/mm <sup>2</sup>	31	99
S	0,025	0,018	Zugfestigkeit	kg/mm <sup>2</sup>	64	111
Ml	9,0	4,36				
Cr	18,3	1,11	Dehnung	%	59	18
W	----	0,74				
			Hinschätzung	%	69	64

Abb. 2: Kraftfluss in Schrauben

1. Stiftschraube (Nach H. Wiegand; Diss. T.H. Darmstadt 1933)

2. Schraube mit normaler 0,8 d hoher Mutter (Nach Staedel; Mittlg. Materialprüfanstalt, T.H. Darmstadt, Heft 4 (1933) u. H. Wiegand; Diss. T.H. Darmstadt 1933)

3. Schraube mit gekerbter 0,8 d hoher Mutter, Kerbtiefe 0,4 d (Nach H. Wiegand; Diss. T.H. Darmstadt 1933)



Unterschriften zu Abbildungen 1 bis 8

Abb. 3: Die Zerspanbarkeit des Gusseisens im Vergleich zu Stahl und Stahlguss. Einfluss des Einstellwinkels ( $30^\circ$  und  $45^\circ$  nach Walliche und Debringhaus).

y: Schnittgeschwindigkeit in m/min.

x: Zugfestigkeit  $\text{kg/mm}^2$

1. Gusseisen; 2. Stahl und Stahlguss

Spantiefe  $\varphi = 4 \text{ mm}$ ; Vershub  $\delta = 1 \text{ mm/U}$

Aus E. Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S. 385, Abb. 489

Abb. 4: Schnittgeschwindigkeit in m/min. beim Zerspanen von Gusseisen im Vergleich zu Stahl und Stahlguss.

y: Schnittgeschwindigkeit in m/min.

x: Brinellhärte  $H_n$ ,  $\text{kg/mm}^2$

1. Gusseisen, 2. Stahl und Stahlguss, 3. Schleuderguss  
- Einstellwinkel  $45^\circ$

Aus E. Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S. 385, Abb. 490

Abb. 6: Beziehungen zwischen Härte und gleitendem Verschleiss bei Gusseisen mit 3,26% C und 2,64% Si (nach E. Söhnchen u. E. Piwowarski)

y: Verschleiss in  $\text{g/cm}^2$  während 5 00 Um

x: Brinellhärte  $H_n = H_{10/3000/30}$  (10 mm Kugel-Dmr, 3000 kg, 30 s)  $\text{kg/mm}^2$

Aus E. Piwowarski: Hochwertiges Gusseisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S. 400, Abb. 515



**Abb. 7 :** Beziehungen zwischen Abnutzung und Gehalt an gebundenem Kohlenstoff (nach A.L. Boegehold)  
y : Verschleiss bei gleitender Reibung nach 24 h in g  
x : gebundener Kohlenstoff %  
Aus E. Piwowarski: Hochwertiges Guss-eisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S. 401, Abb. 519.

**Abb. 5 :** Zusammenhang zwischen Abnutzung und Graphitverteilung (linearer Graphitdurchsetzung) nach A. Wallich und J. Greger.  
y : Verschleiss mg nach 5000 U  
x : lineare Graphitdurchsetzung, abgezählt je mm eines Hilfeliniennetzes  
Aus E. Piwowarski: Hochwertiges Guss-eisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S. 403, Abb. 523a.

**Abb. 8 :** Einfluss des Phosphors auf den Verschleiss von Guss-eisen. Methode nach Spindel (nach Klingenstein).  
y : Verschleiss in mm  
x : Phosphorgehalt in %  
Aus E. Piwowarski: Hochwertiges Guss-eisen, Berlin 1942, Springer-Verlag, S. 404, Abb. 524.

*Kane mann*

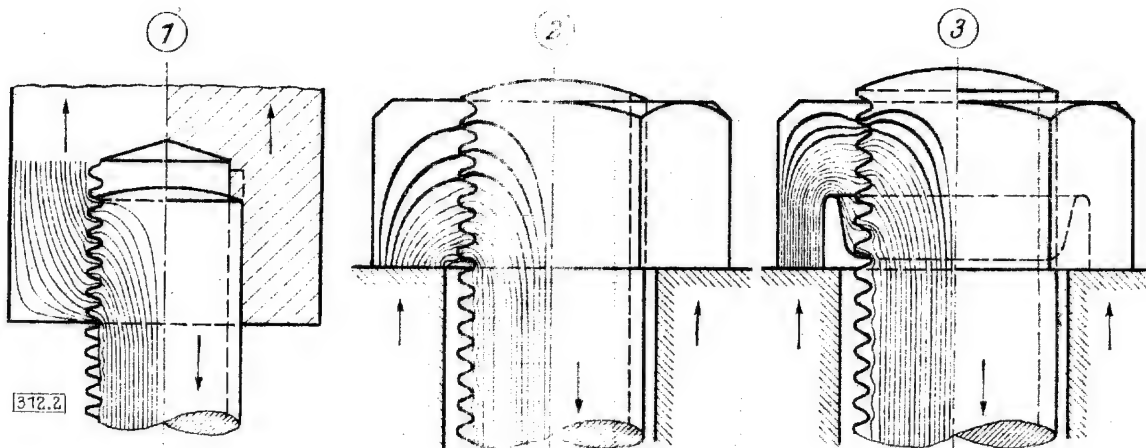


Abb. 2 Рис. 2

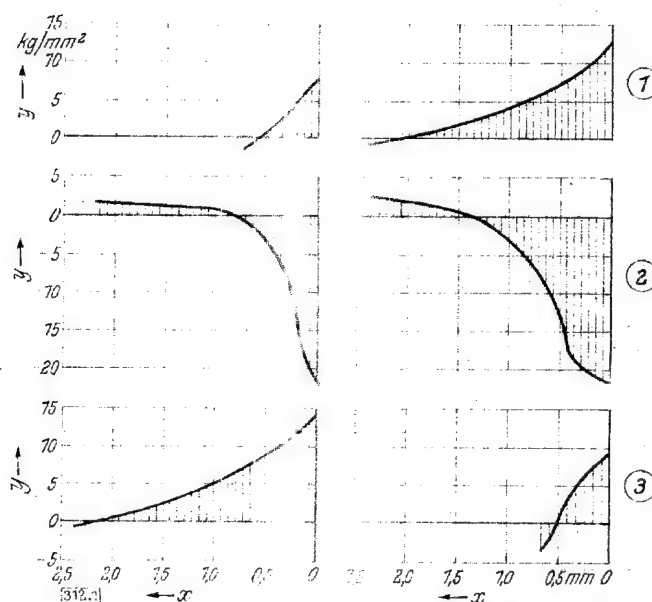


Abb. 1 Рис. 1

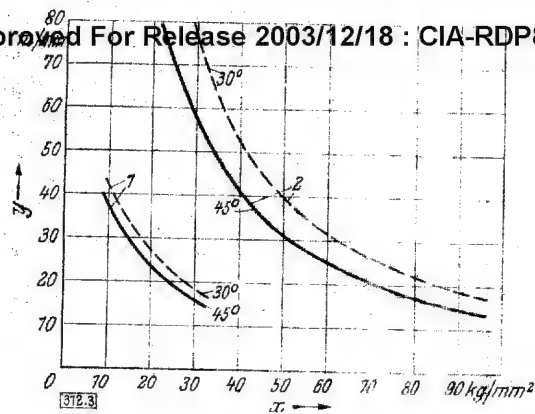


Abb. 3 Рис. 3

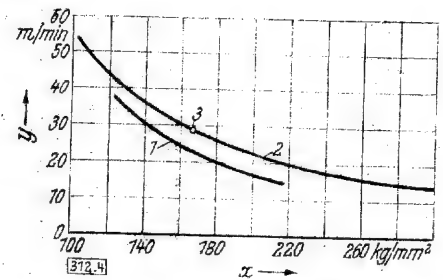


Abb. 4 Рис. 4

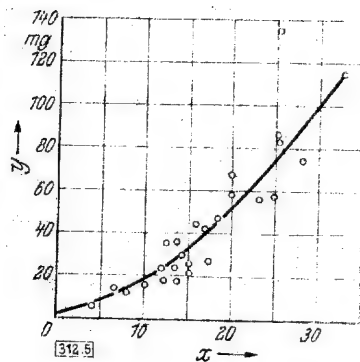


Abb. 5 Рис. 5

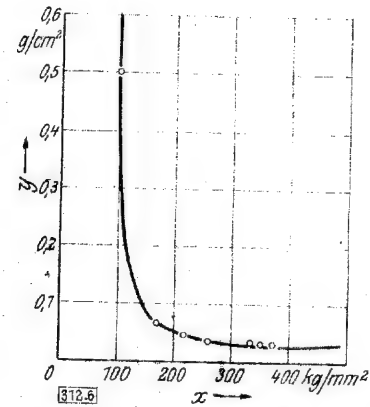


Abb. 6 Рис. 6

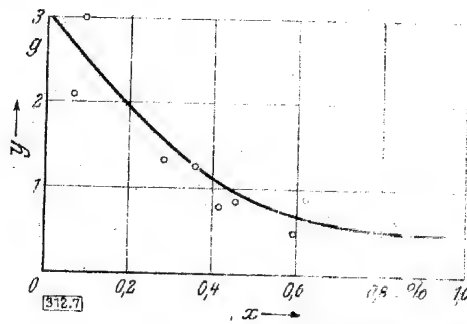


Abb. 7 Рис. 7

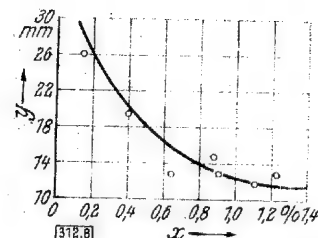


Abb. 8 Рис. 8

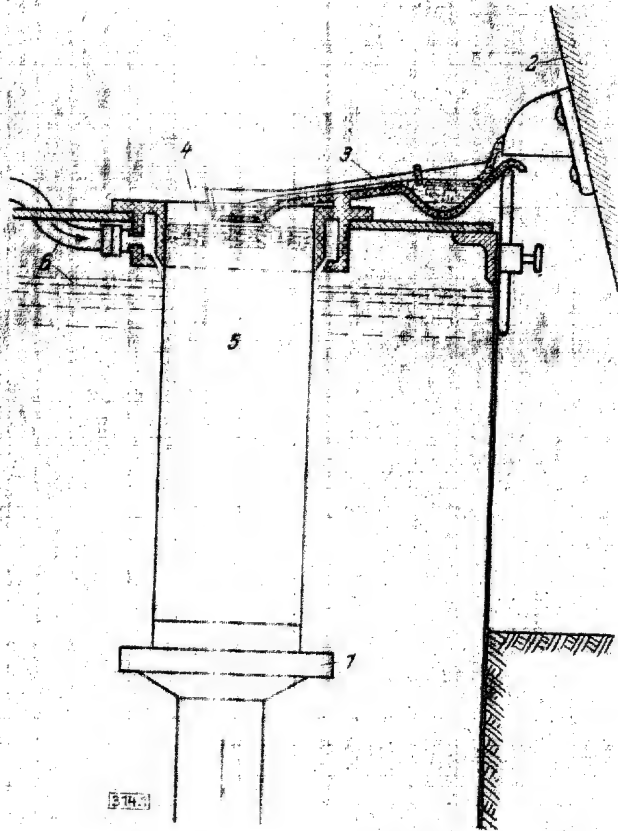


Abb. 1 Pnc. 1

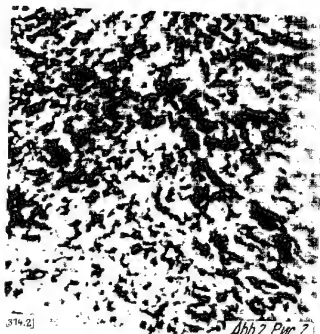


Abb.2 Pnc.2

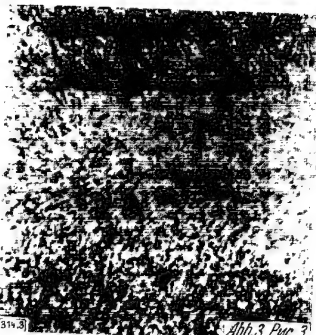


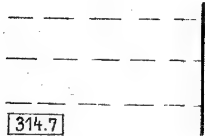
Abb.3 Pnc.3



Abb.4 Pnc.4



Abb.5 Pnc.5



314.7

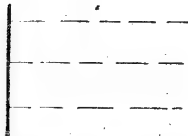
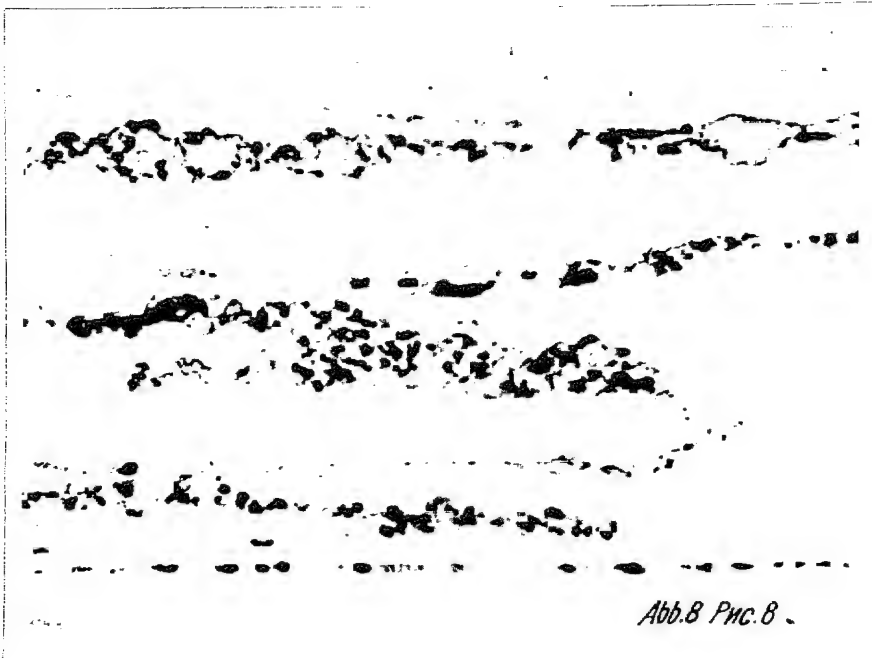


Abb.7 Pnc.7





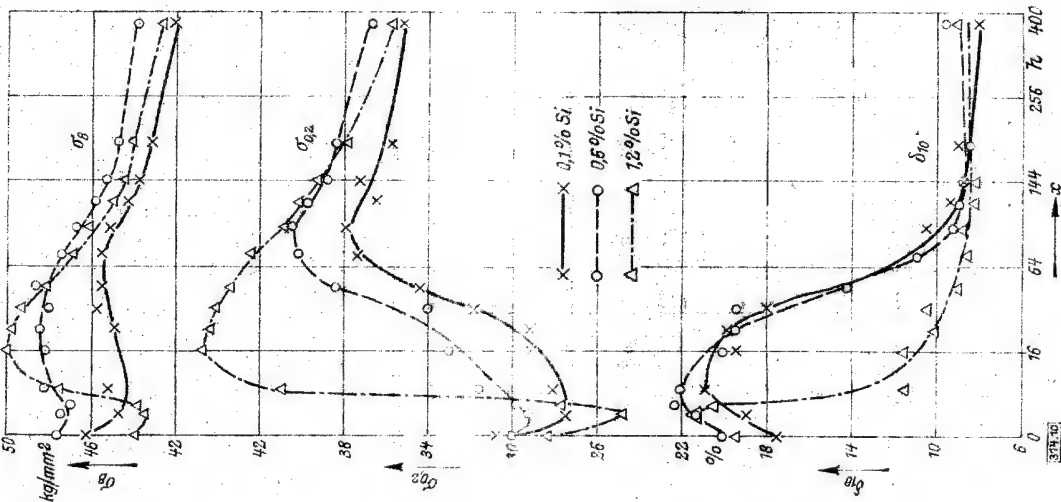


Abb.10 Pwc.10

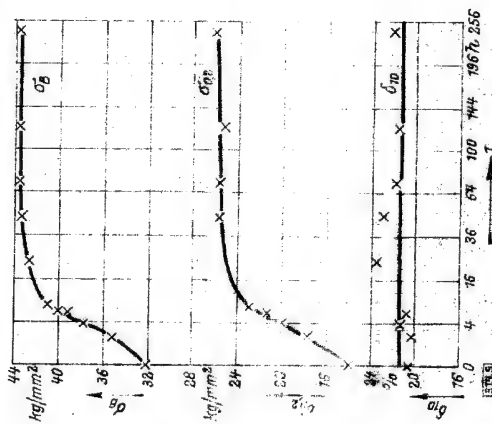


Abb.9 Pwc.9

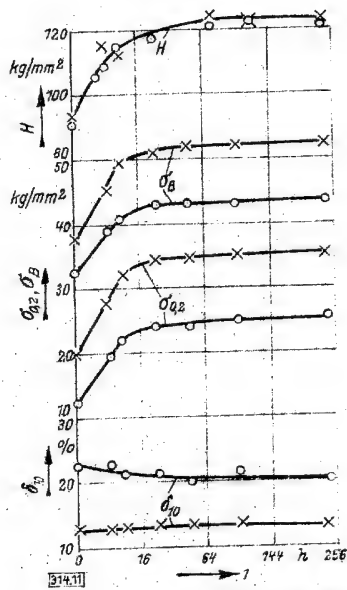


Abb.11 Рис.11

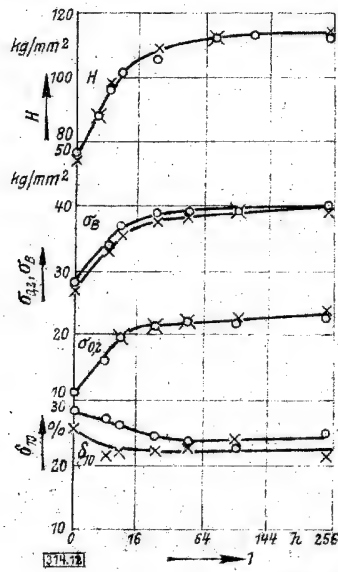


Abb.12 Рис.12

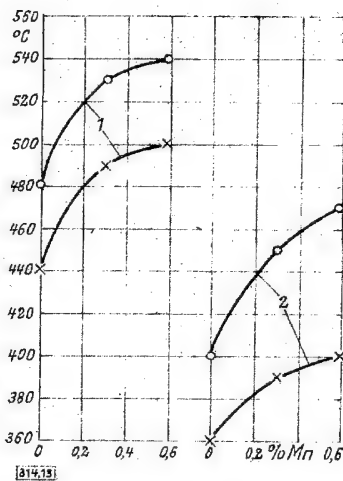


Abb.13 Рис.13

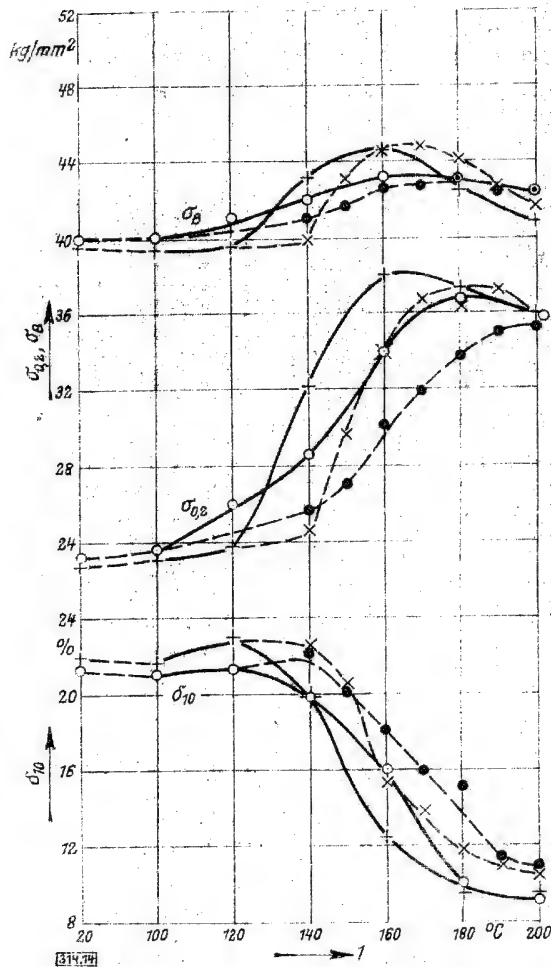


Abb.14 Рис.14

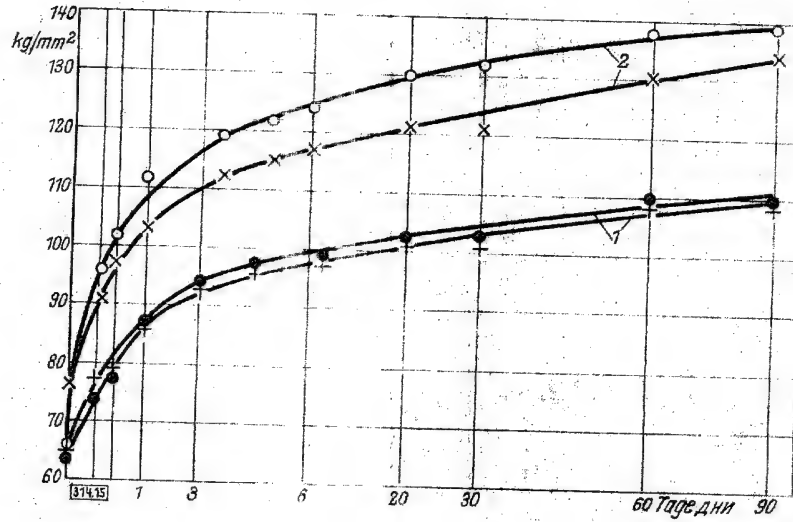


Abb. 15 Рис. 15

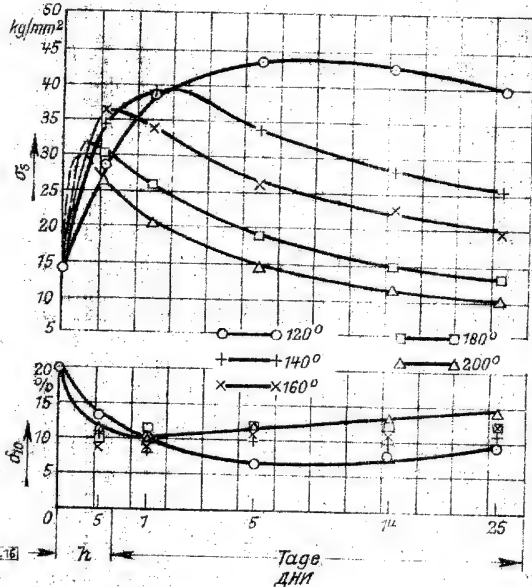
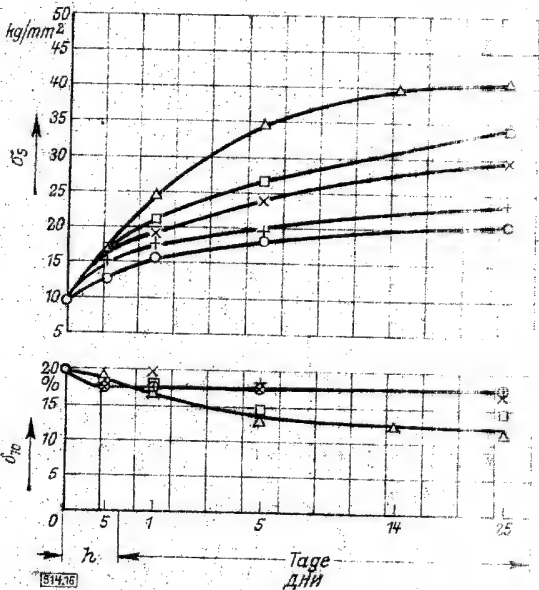
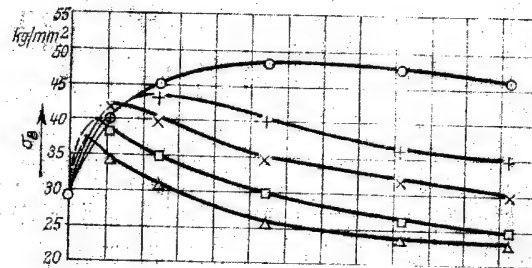
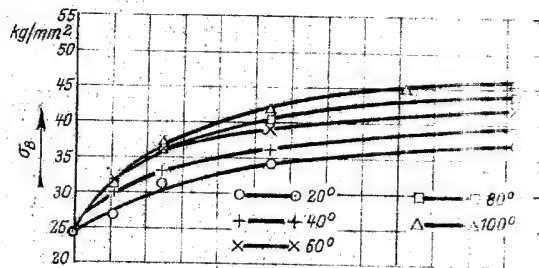


Abb. 16 Рис. 16

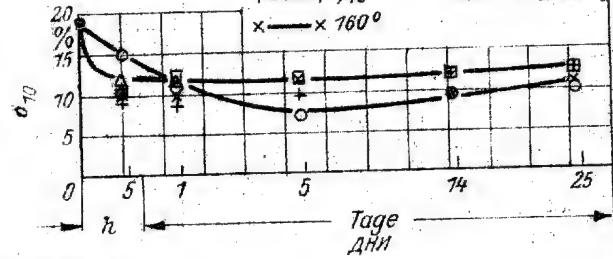
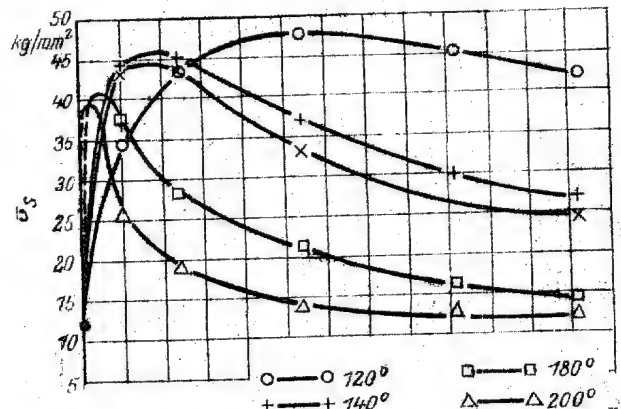
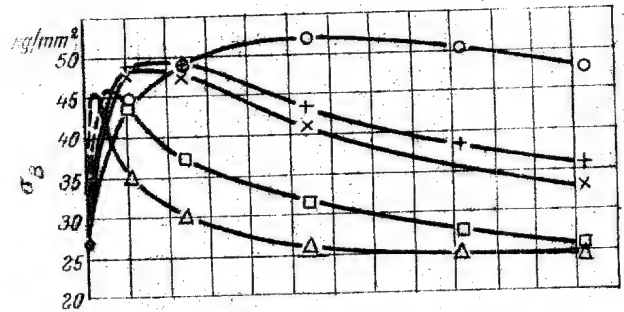
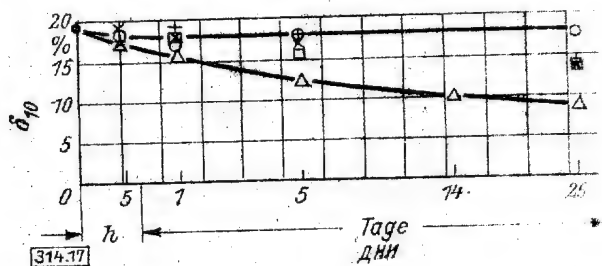
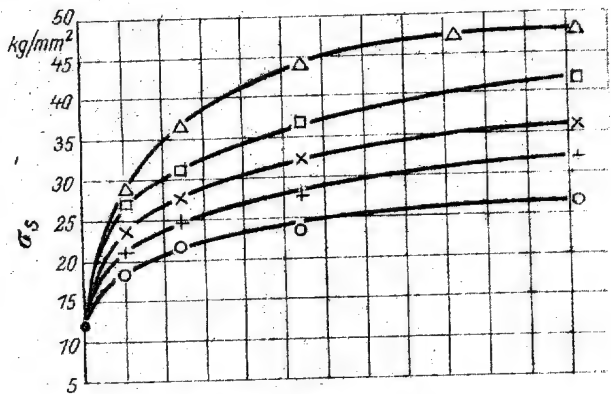
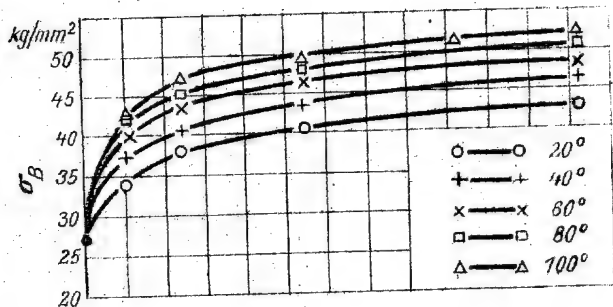


Abb. 17 Рис. 17

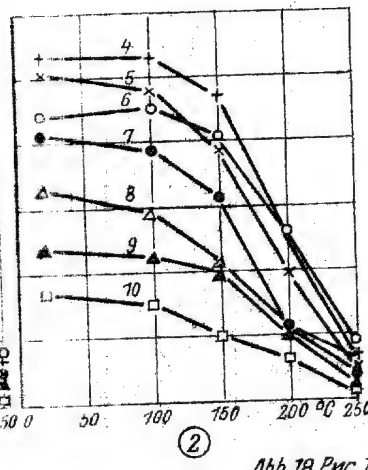
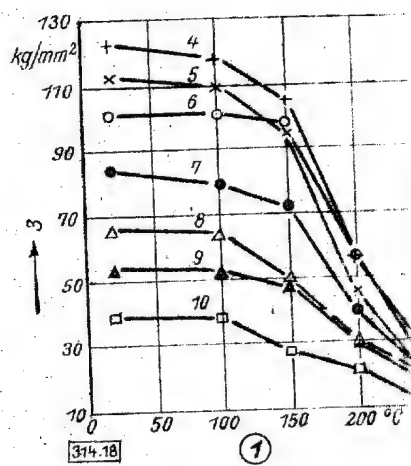
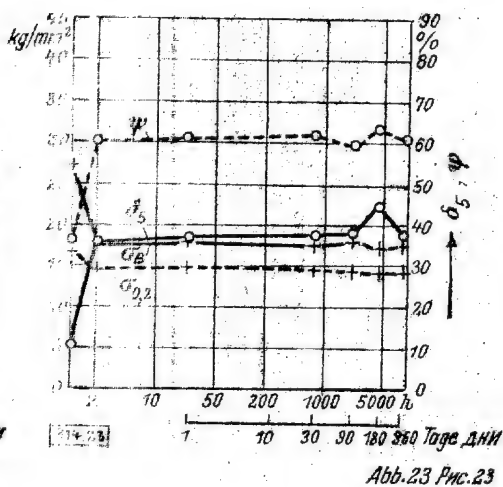
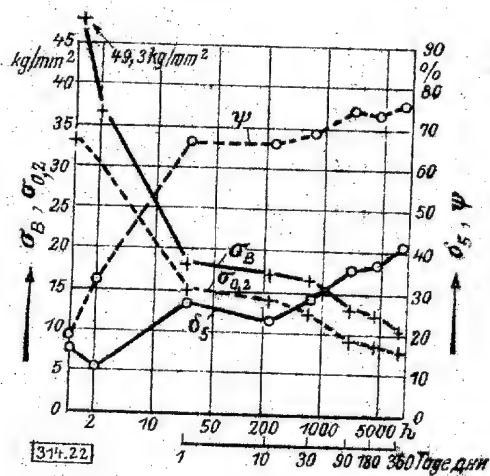
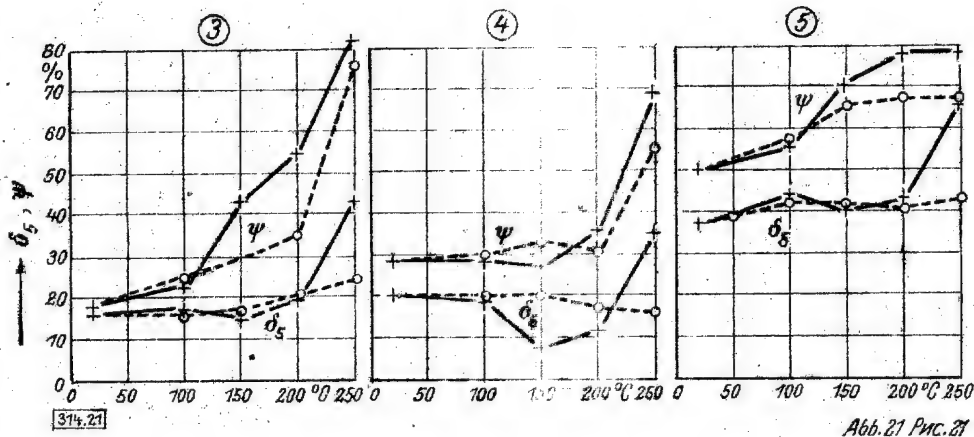
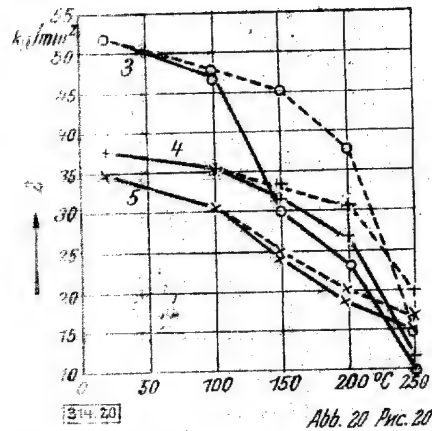
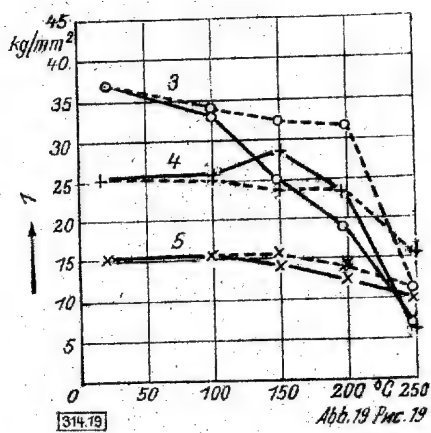
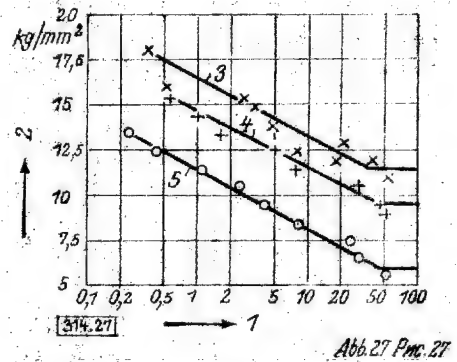
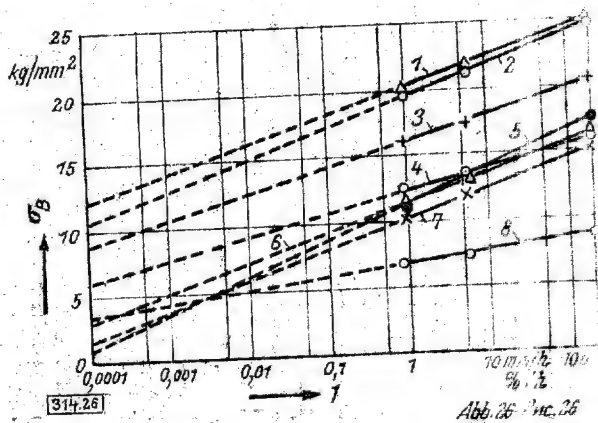
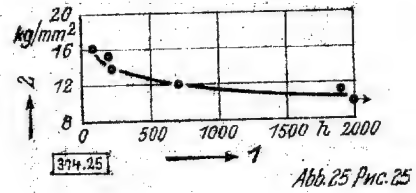
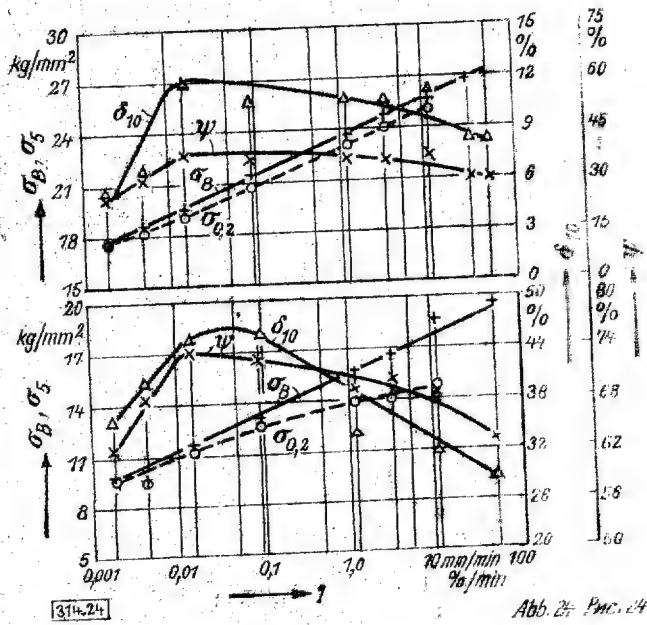
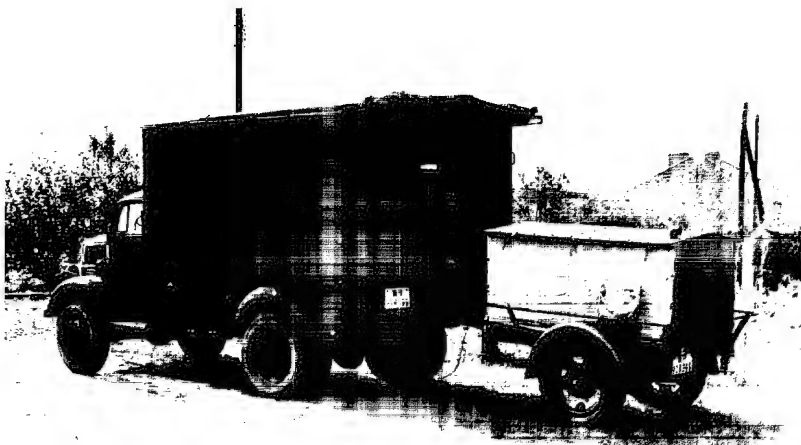


Abb. 18 Рис. 18



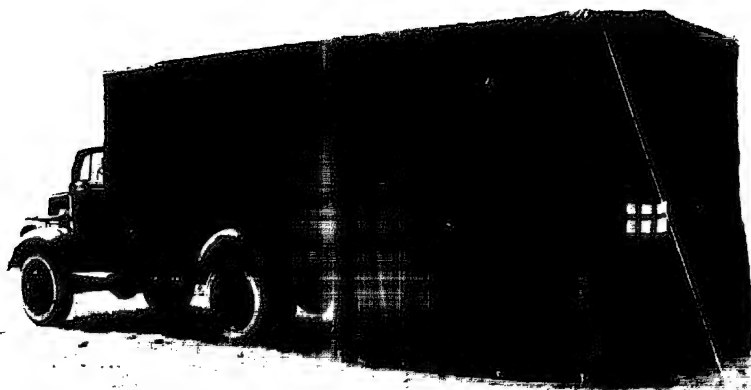






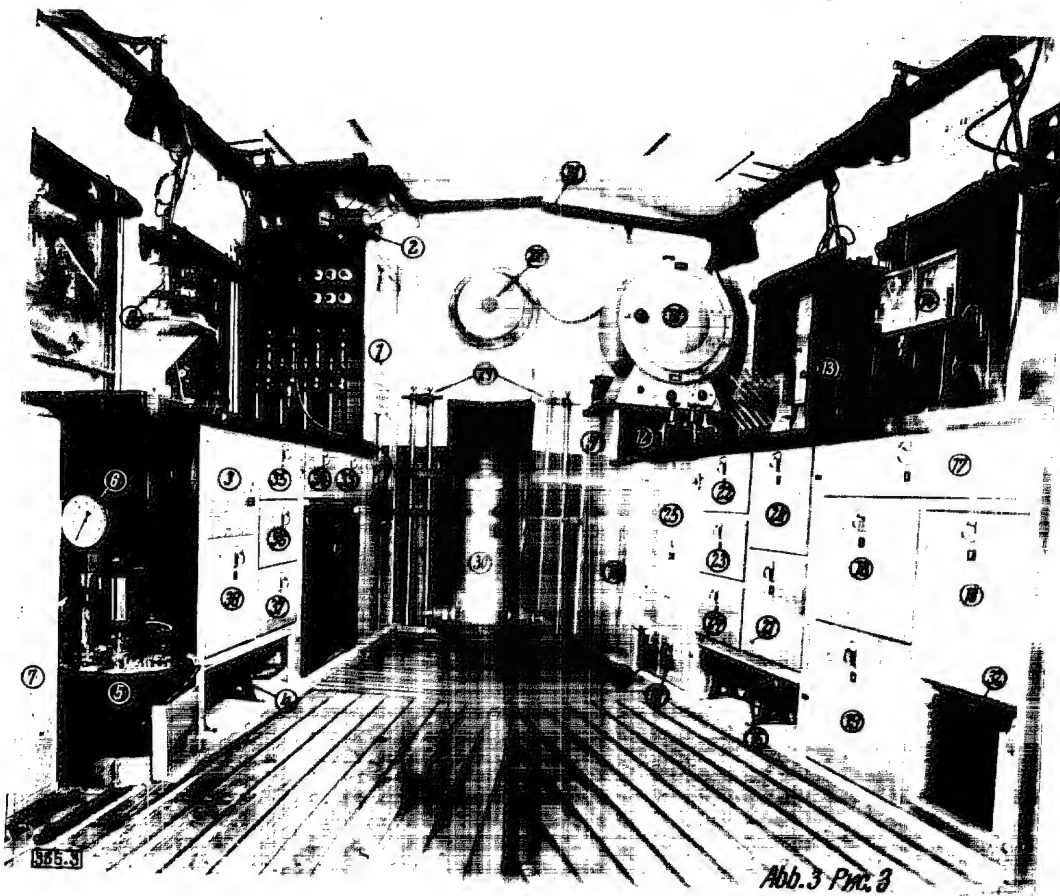
355.1

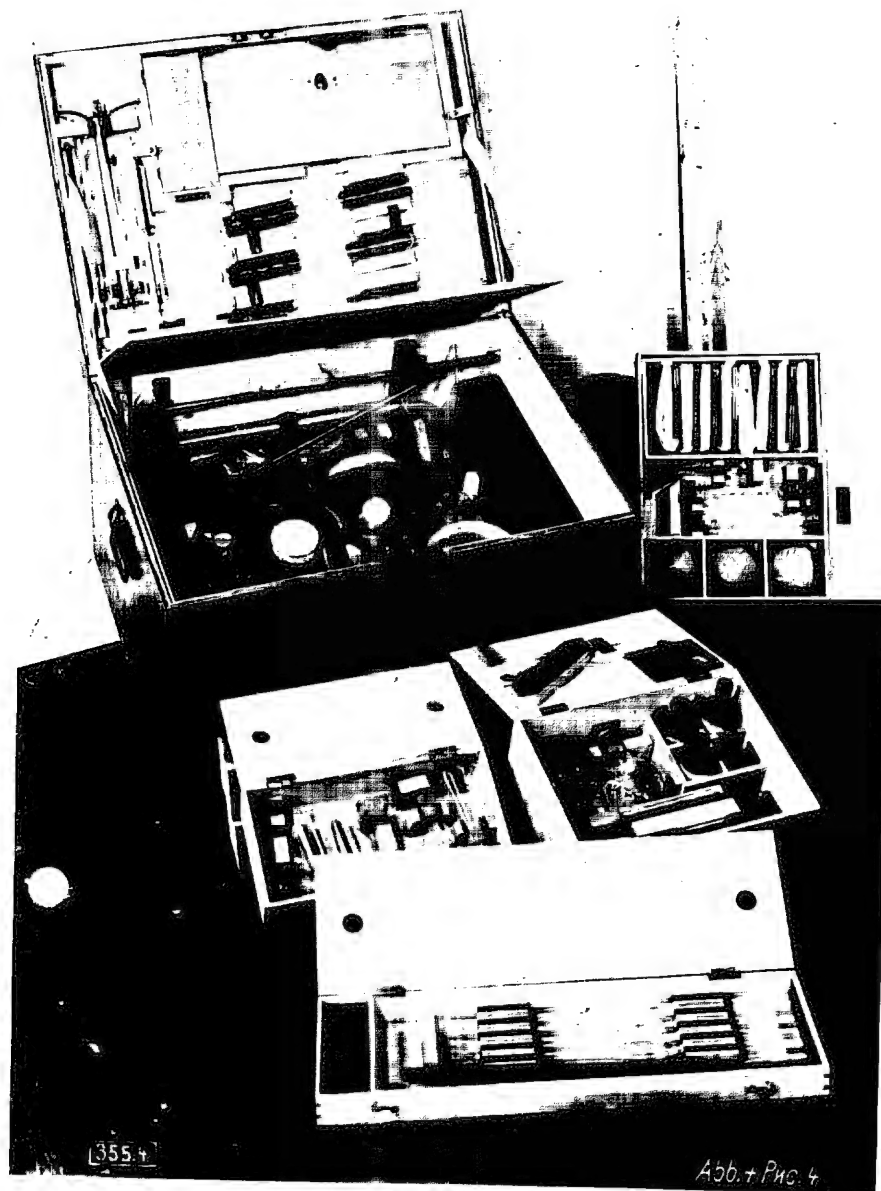
Abb.1 Pnc.1



355.2

Abb.2 Pnc.2





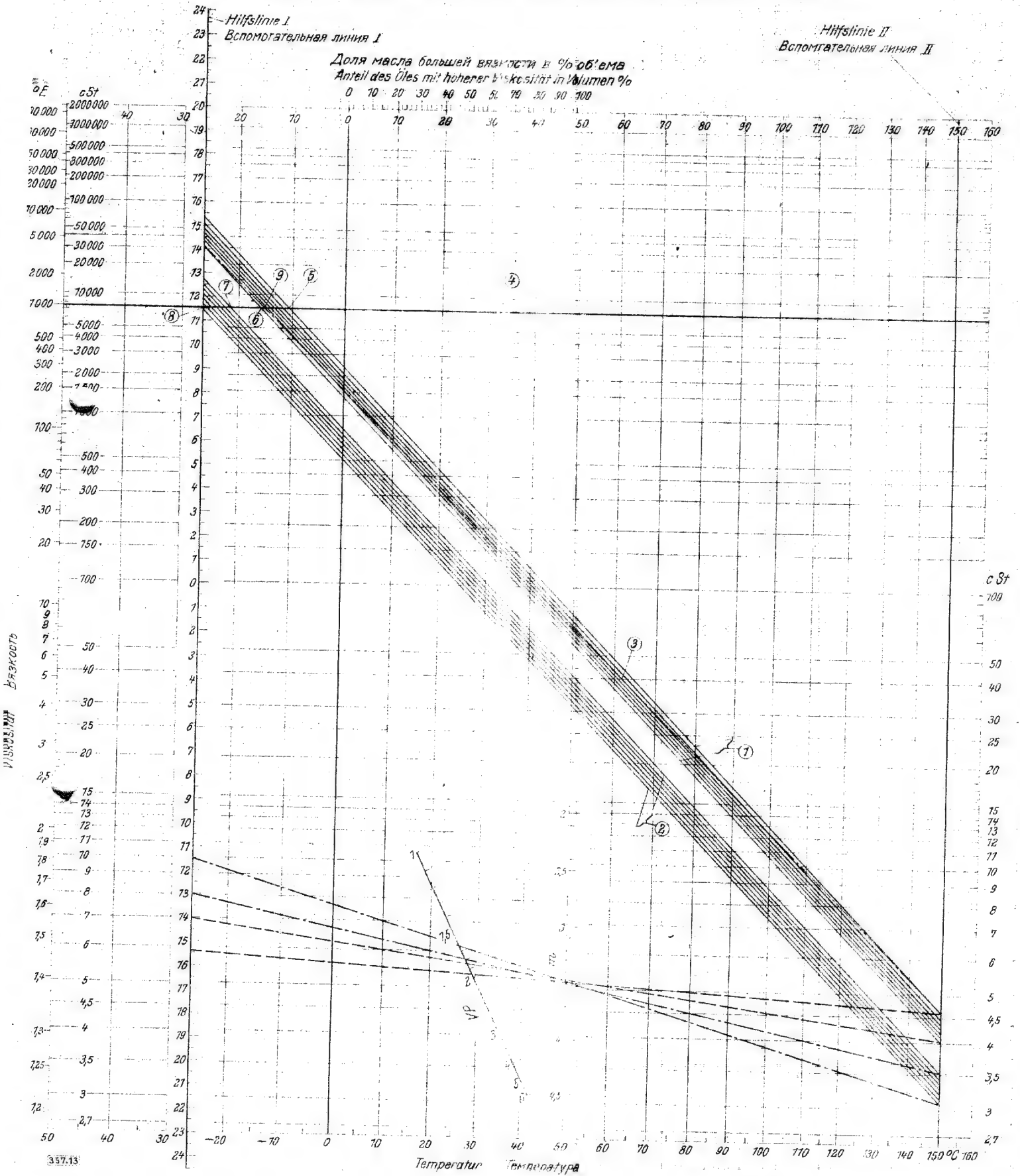


Abb. 13 Рис. 13

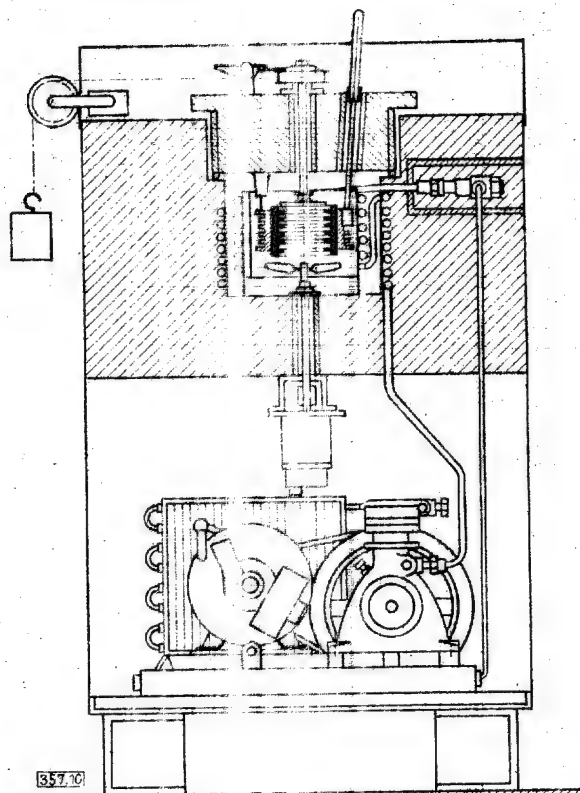
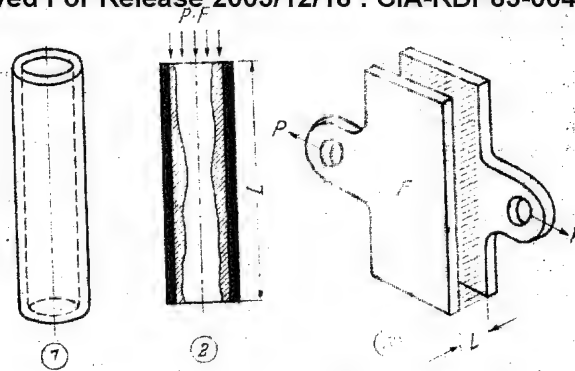


Abb. 10. Рис. 10



357.9

Abb. 9 Рис. 9

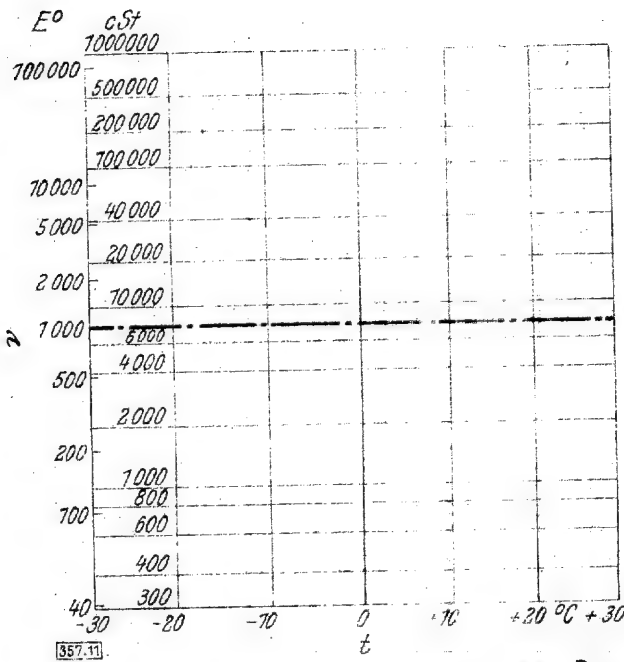


Abb. 11 Рис. 11

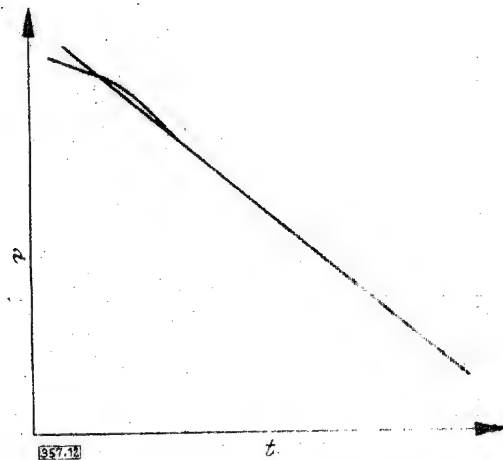


Abb. 12 Рис. 12



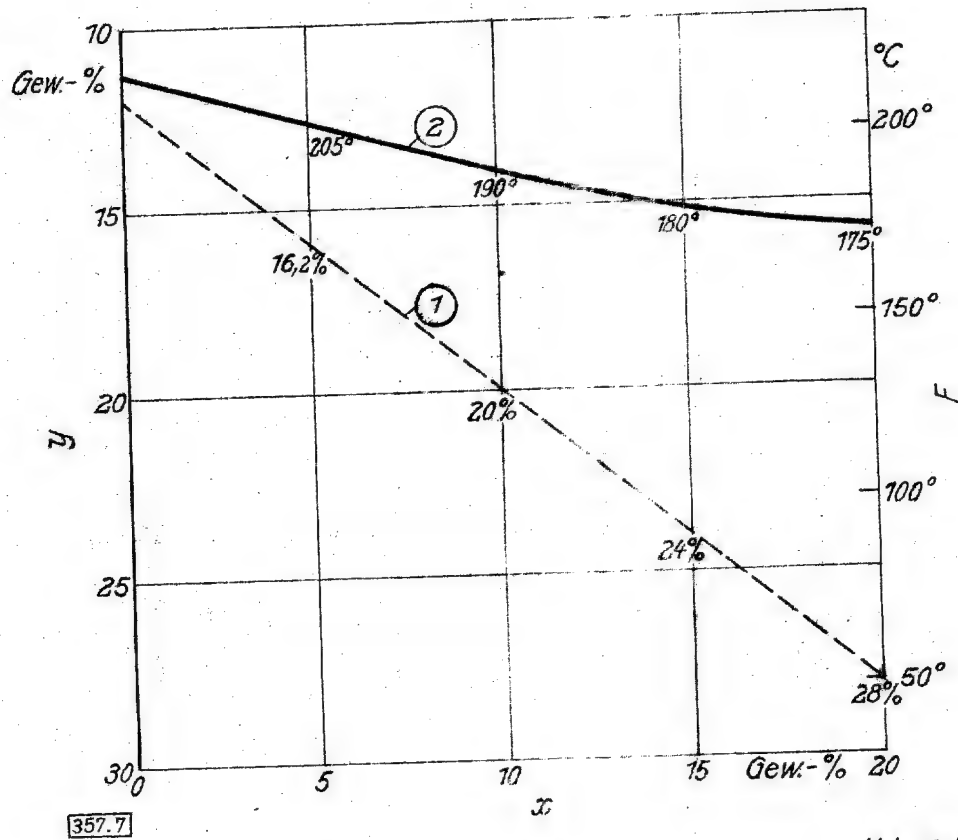


Abb. 7 Рис. 7

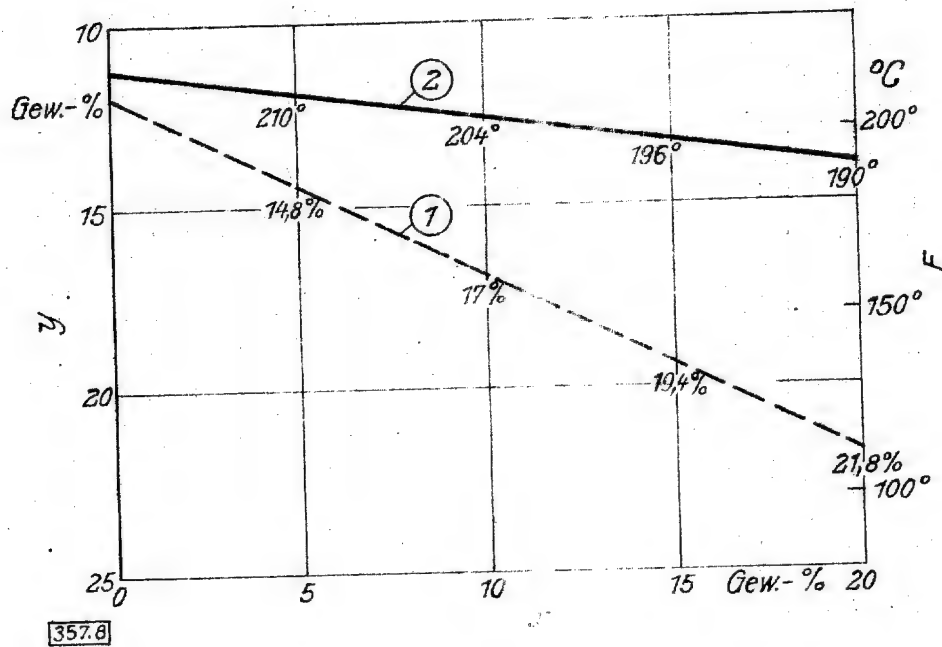
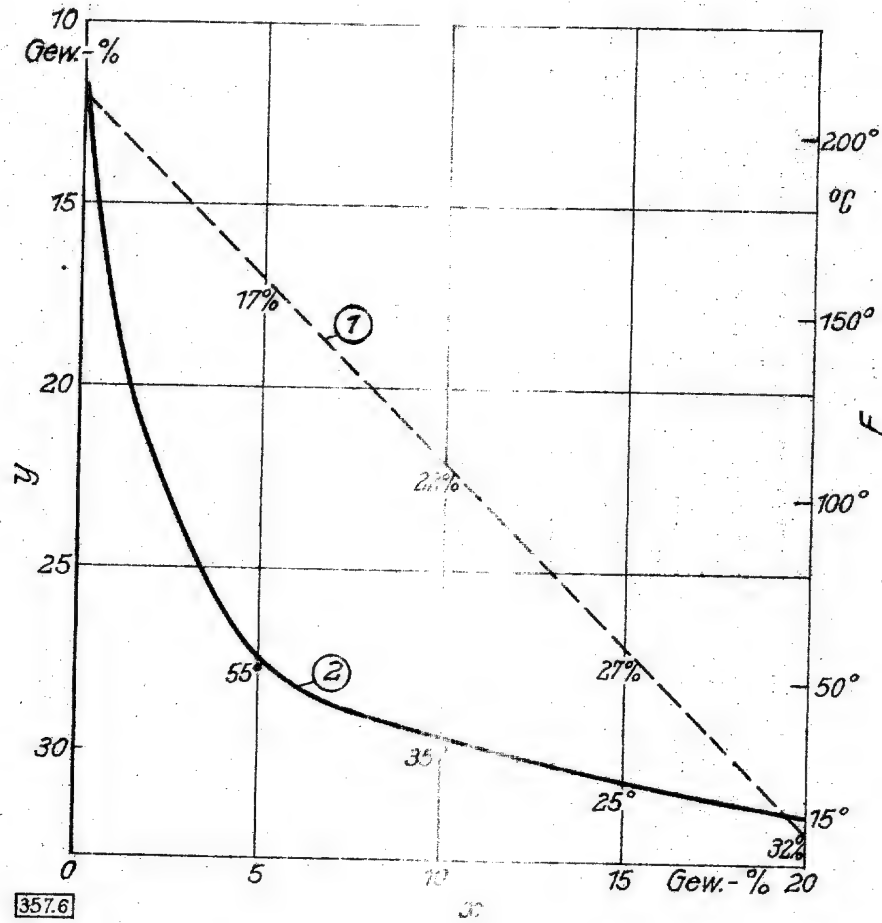


Abb. 8 Рис. 8



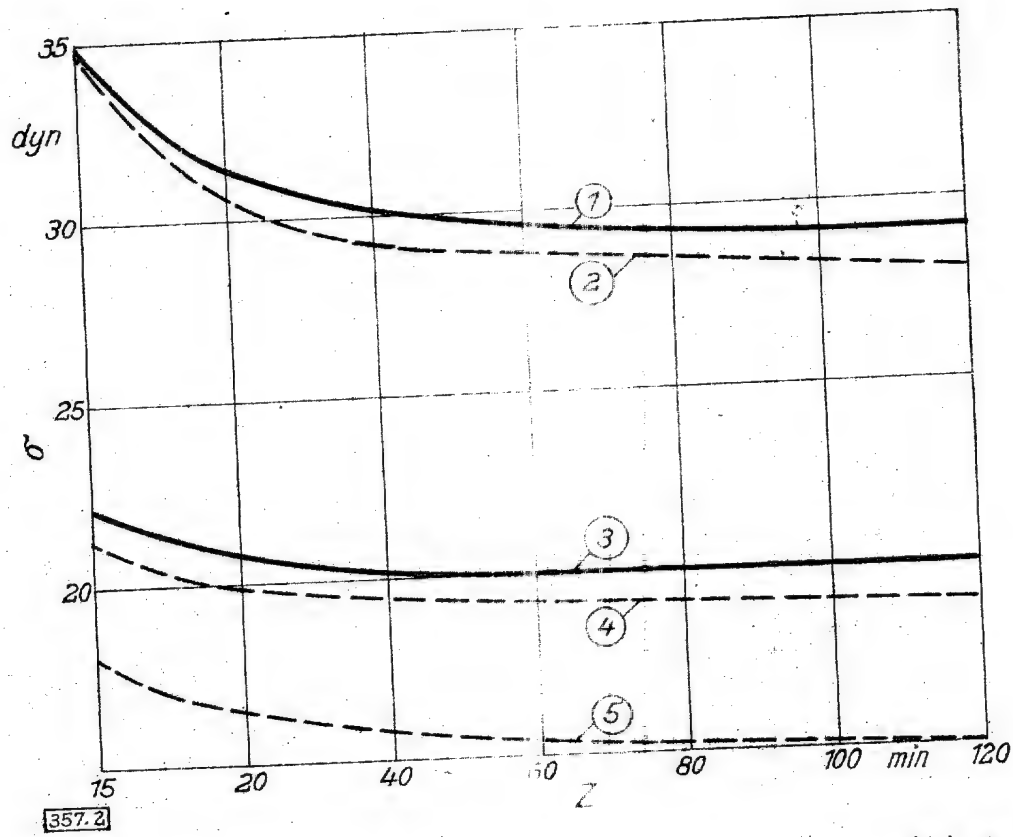


Abb. 2 Рис. 2

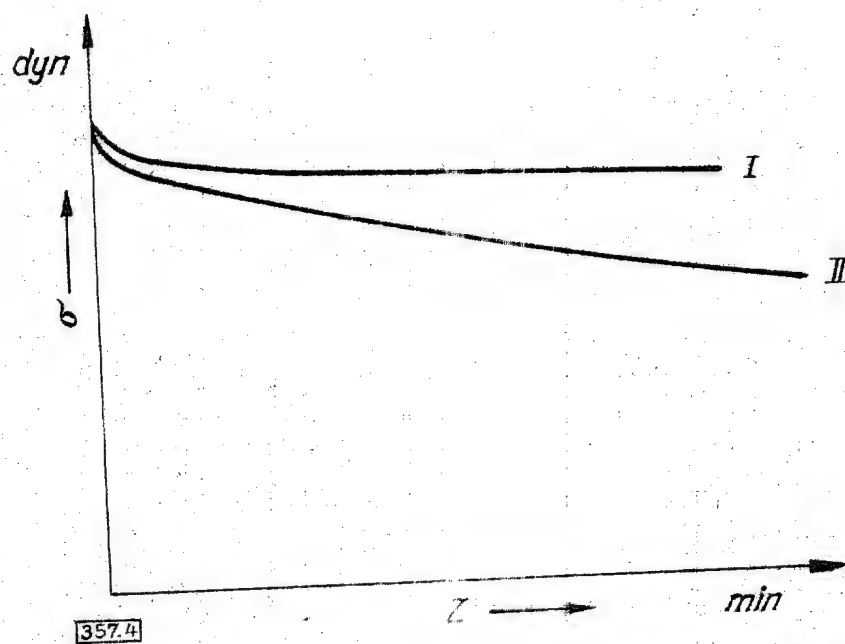


Abb. 4 Рис. 4

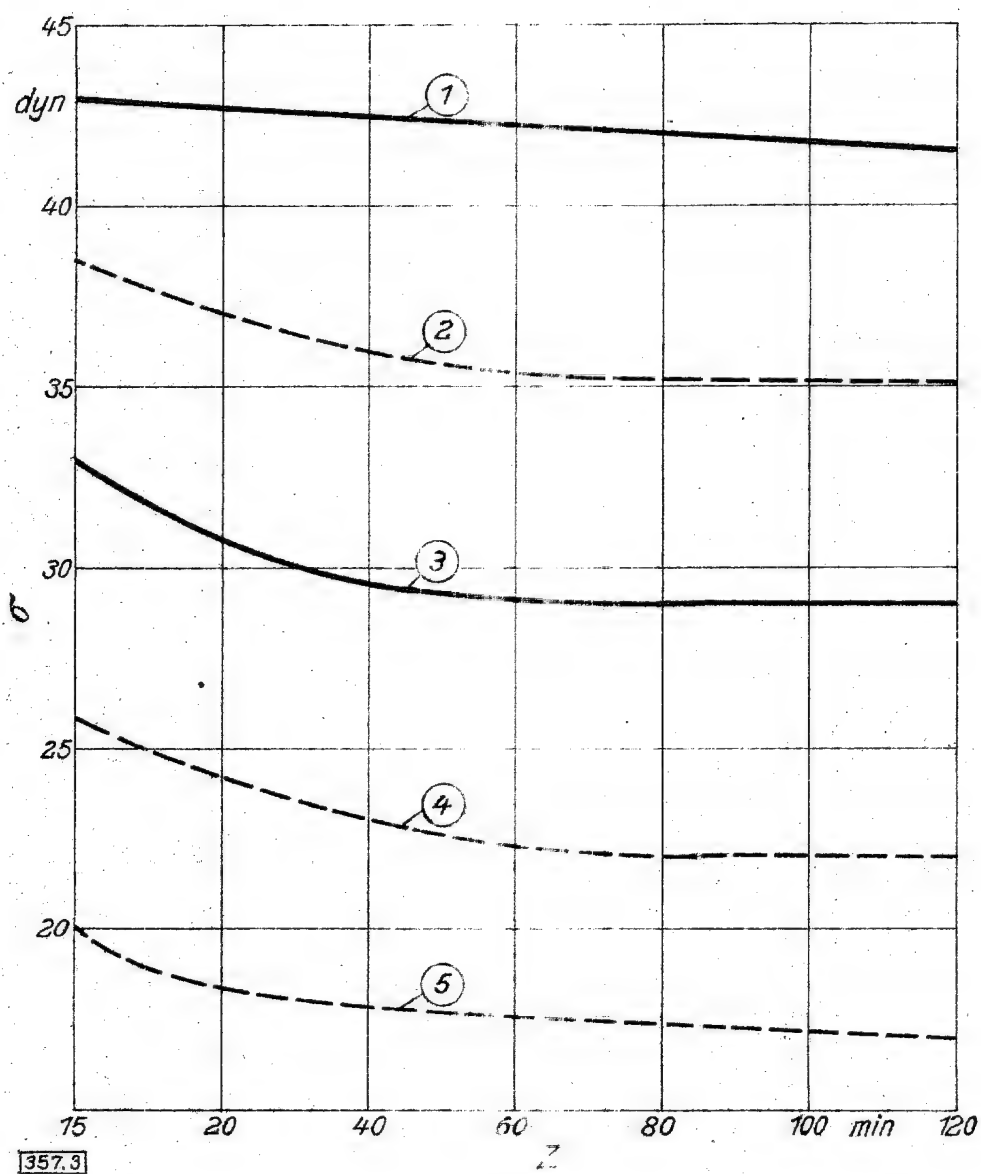


Abb.3 Рис.3

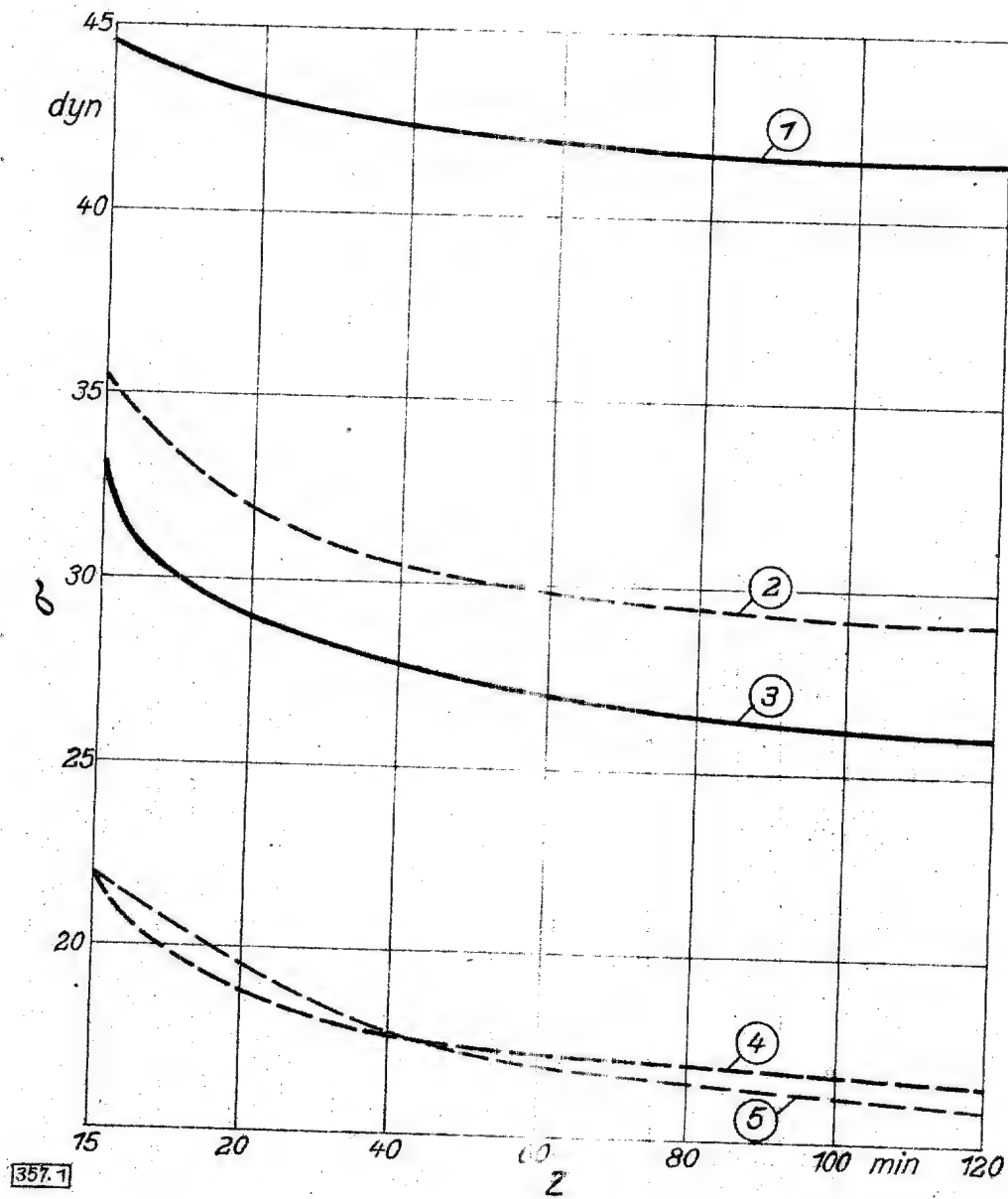


Abb. 1 Рис. 1

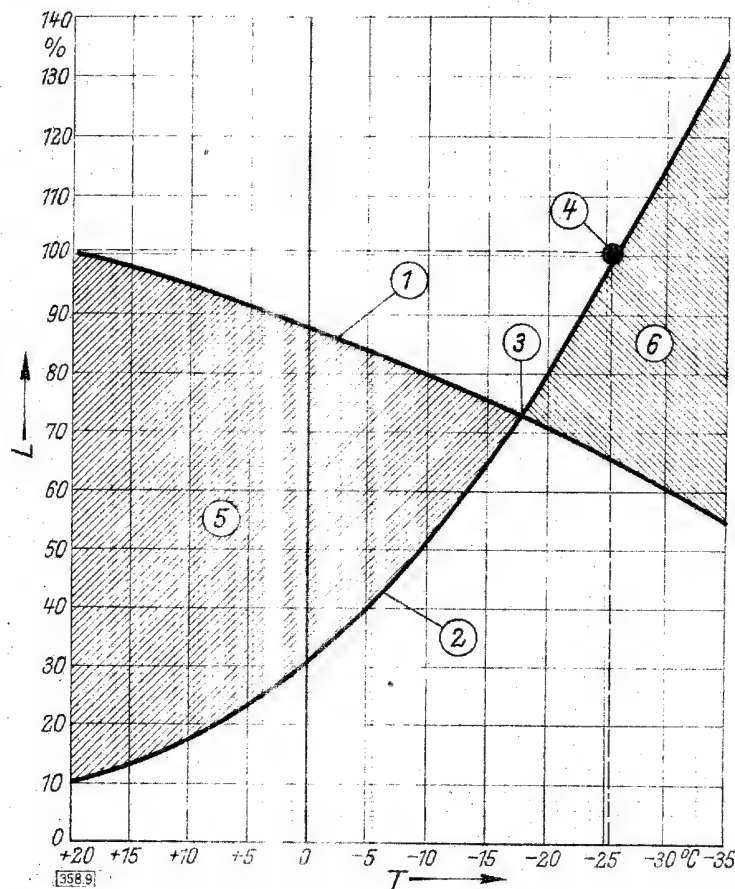


Abb.9 Рис.9



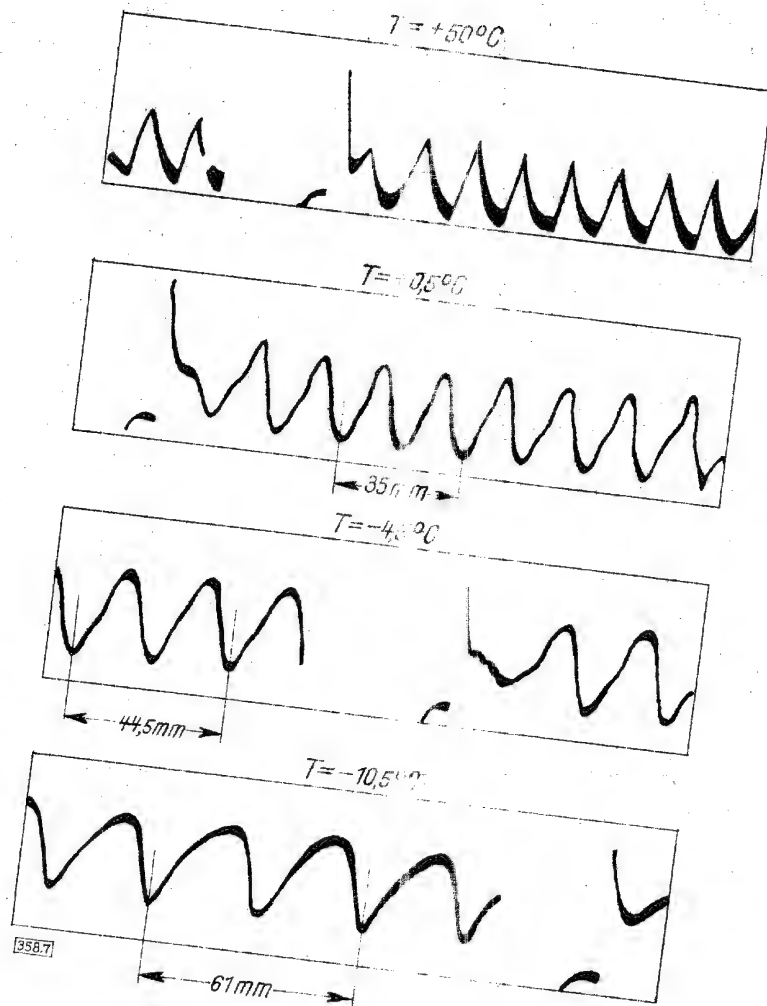


Abb. 7 Рис. 7

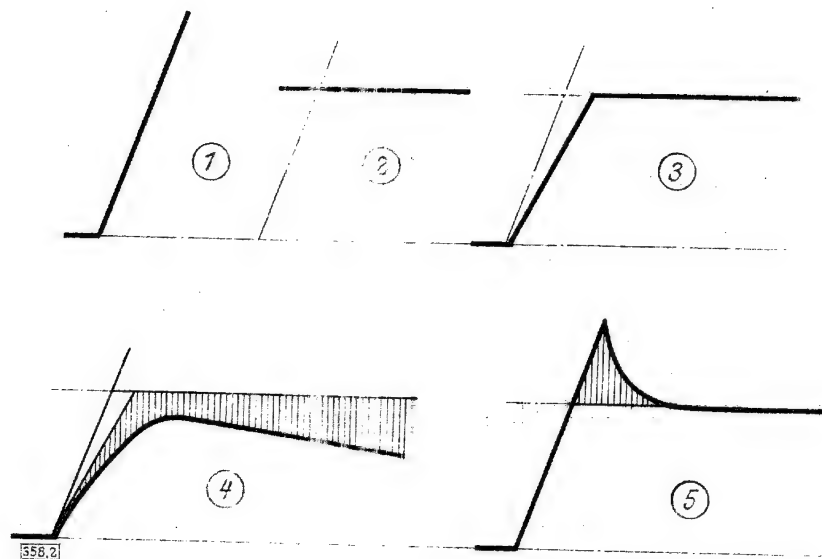


Abb.2 Рис.2

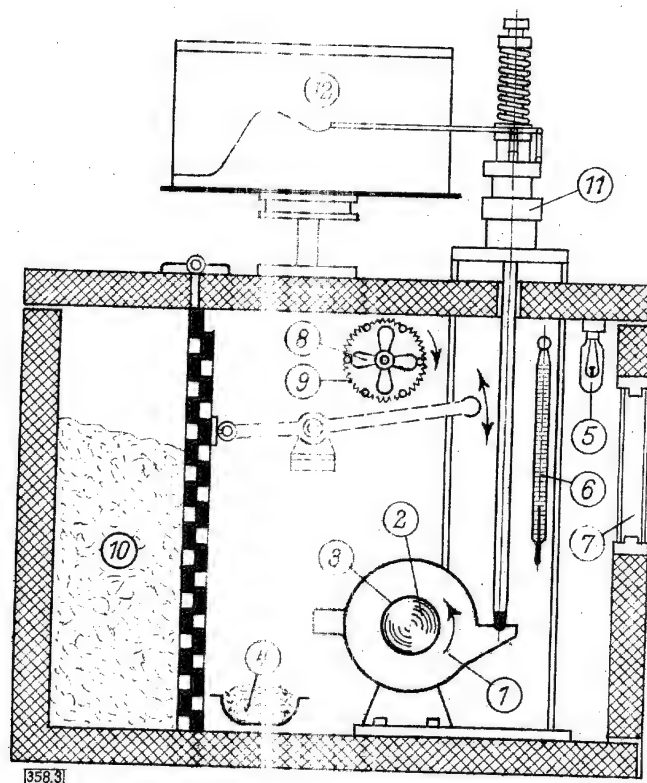


Abb.3 Рис.3

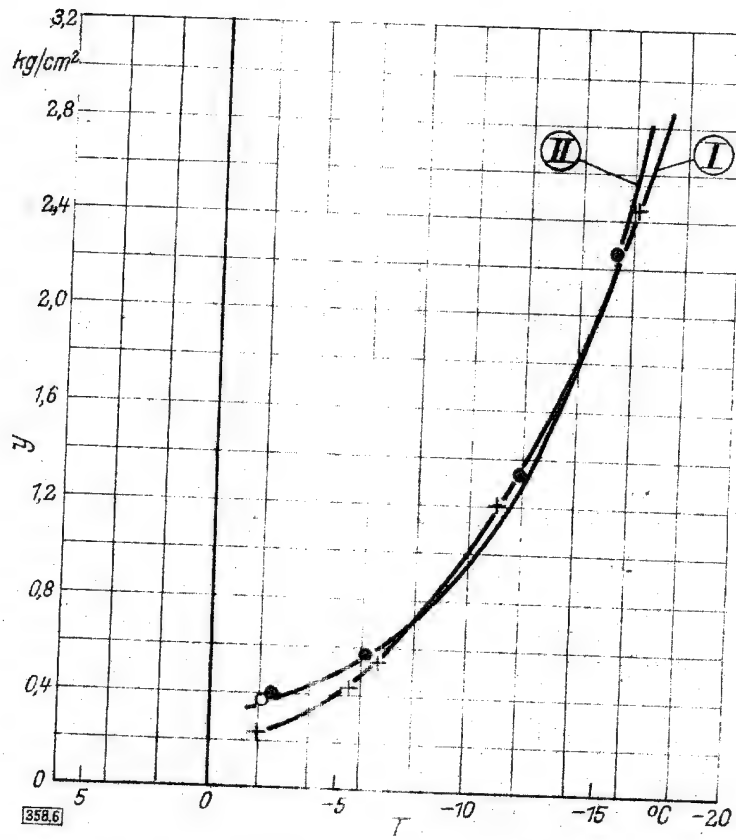


Abb.6 Рис.6

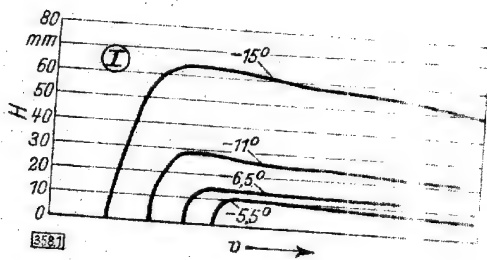
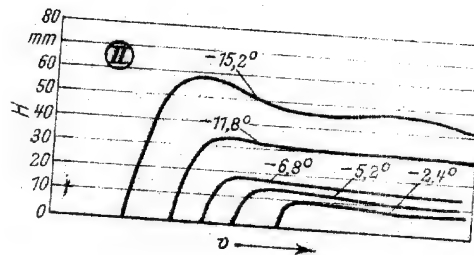


Abb.7 Рис.7



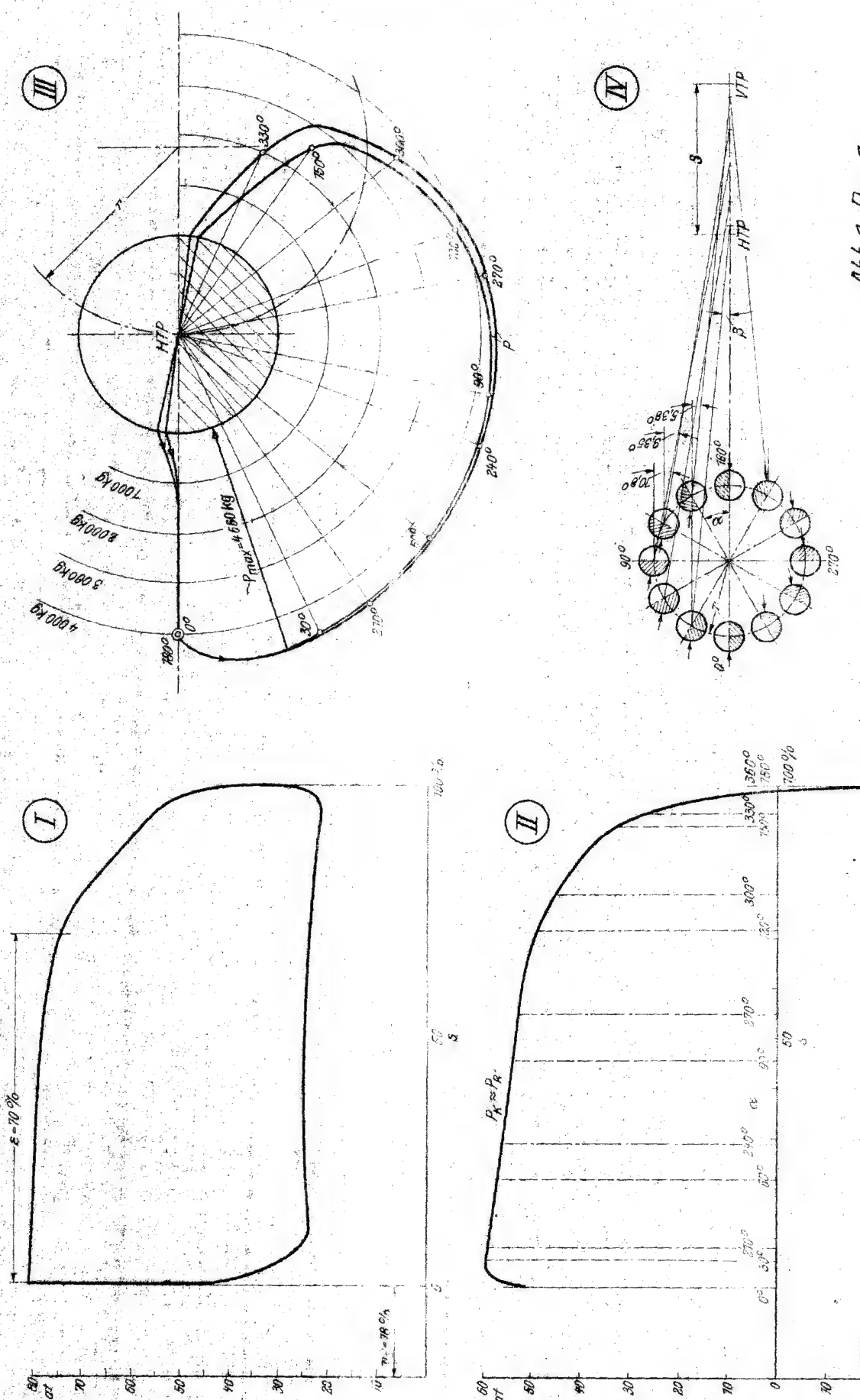
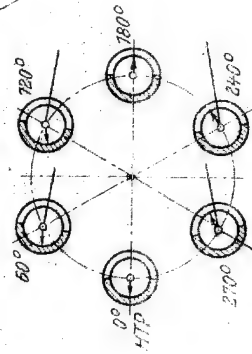
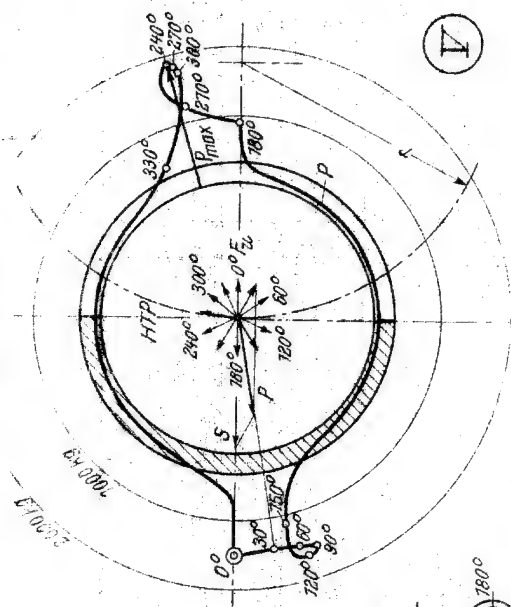
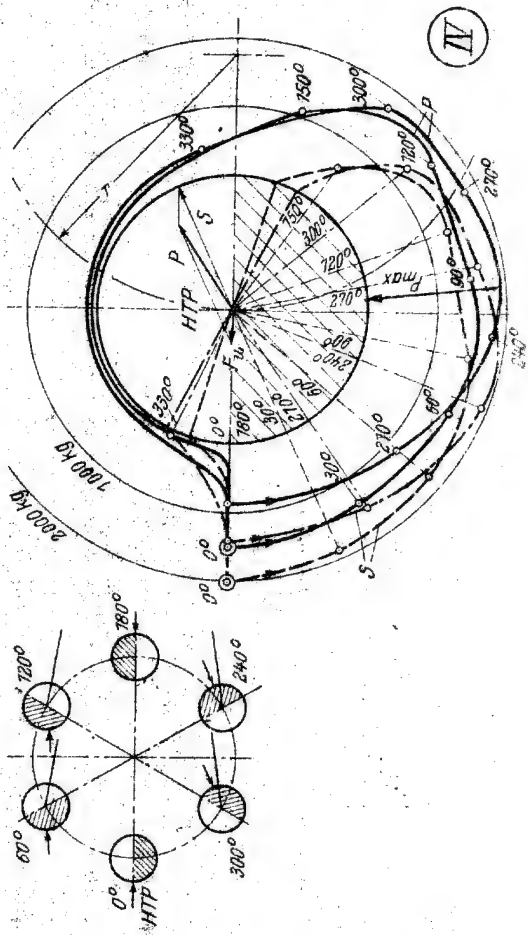
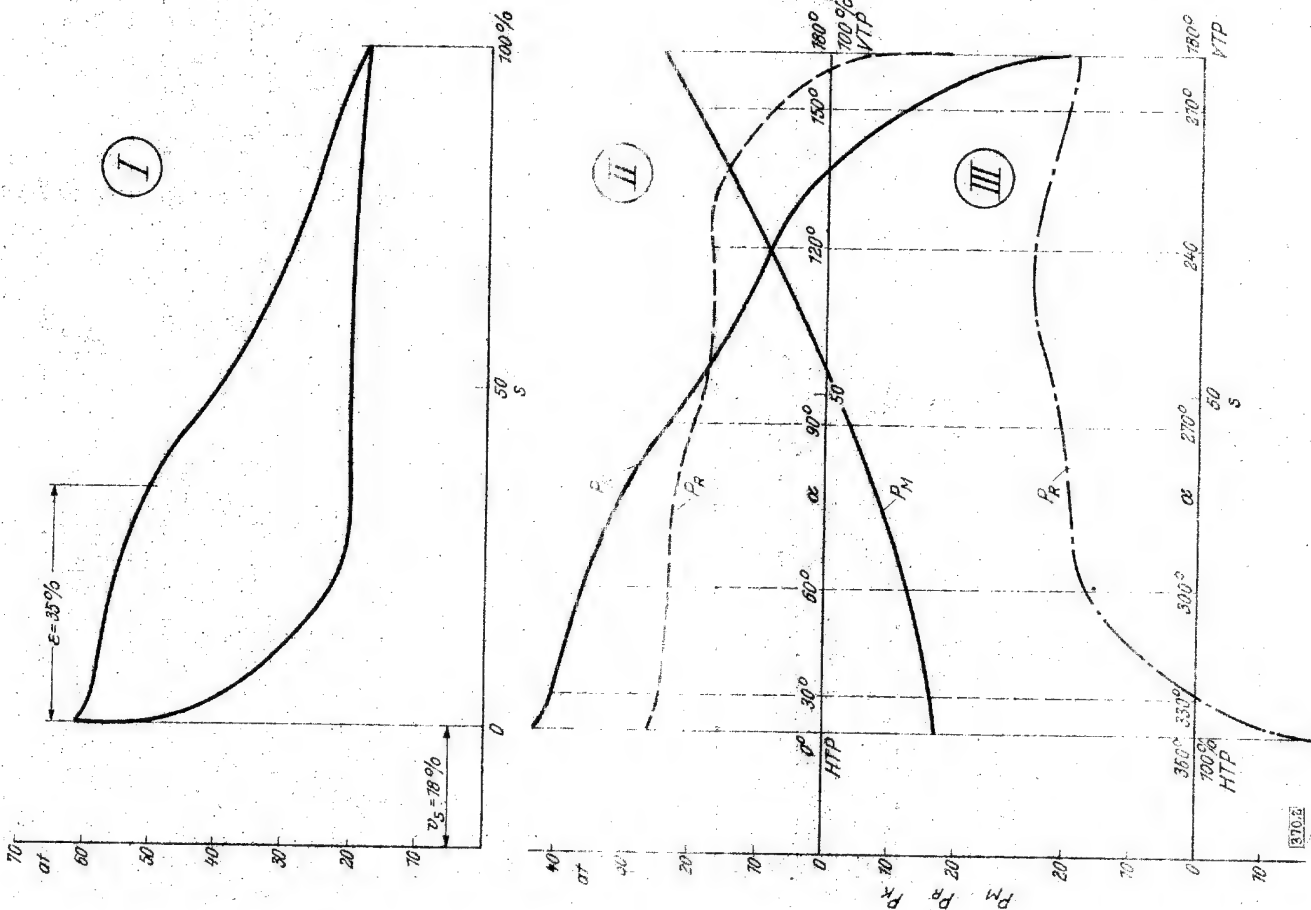
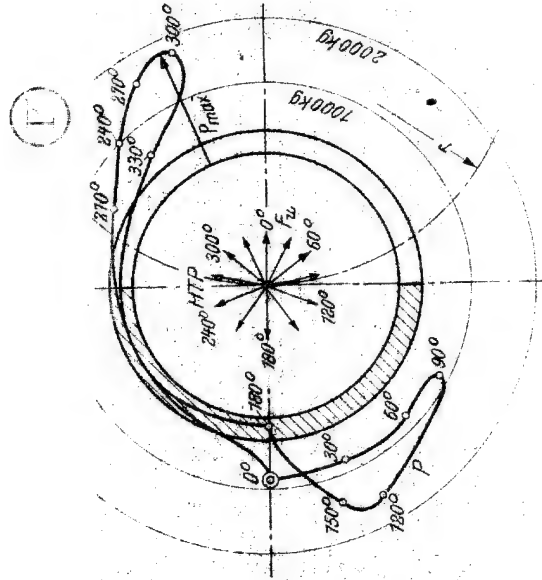
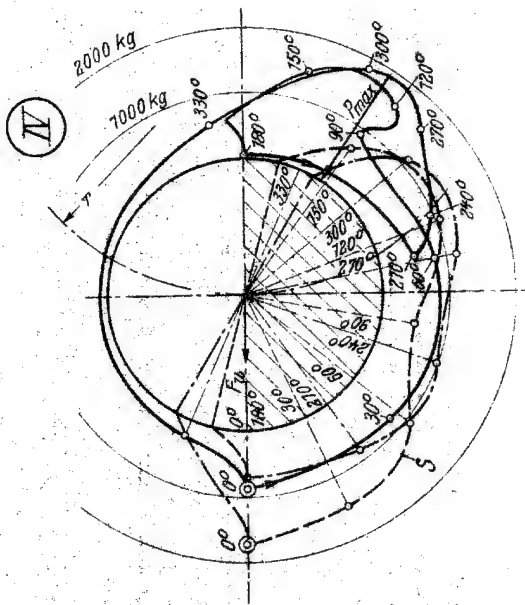
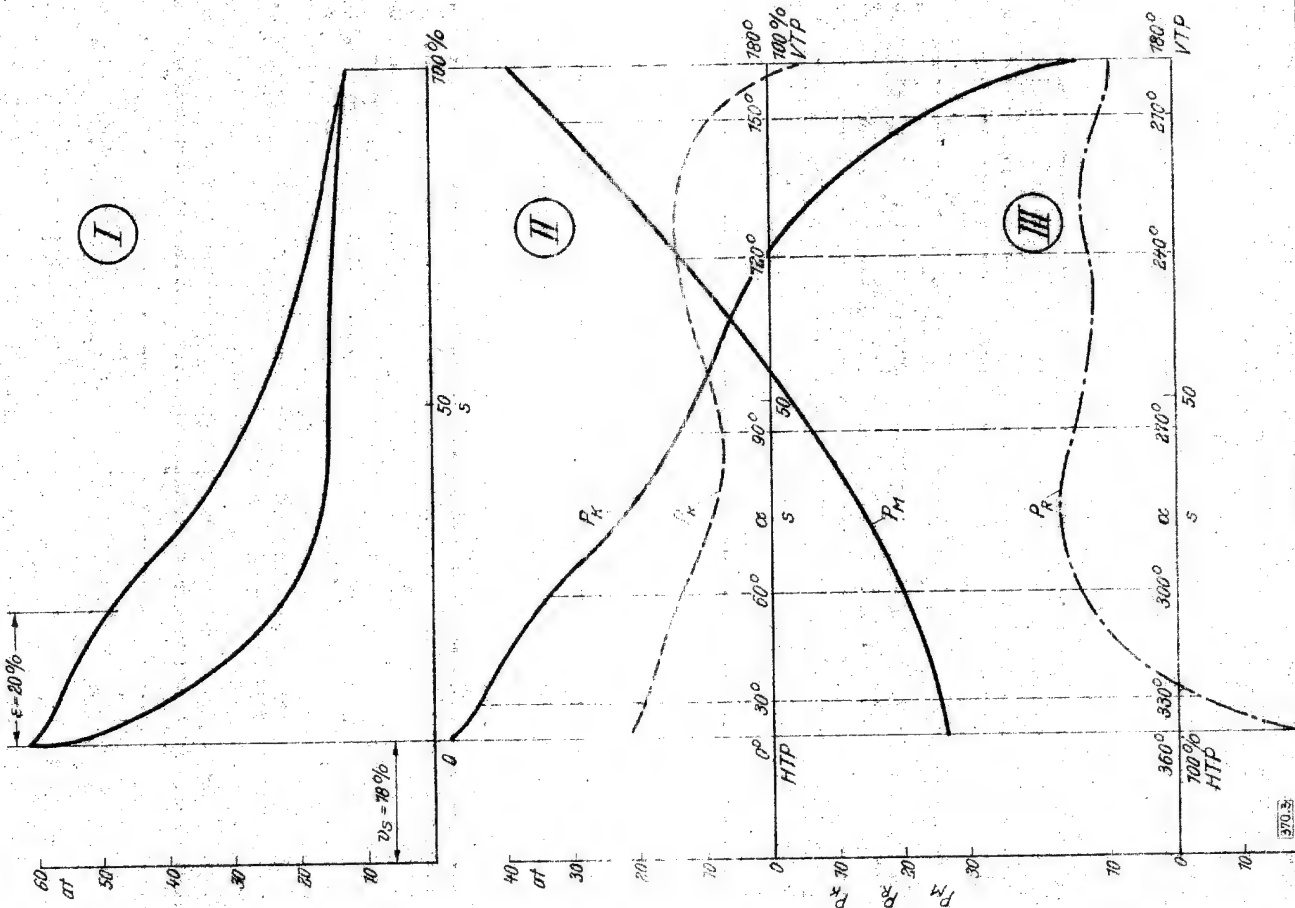


Abb. 7 Pnc. 7

Abb. 2 Pnc. 2







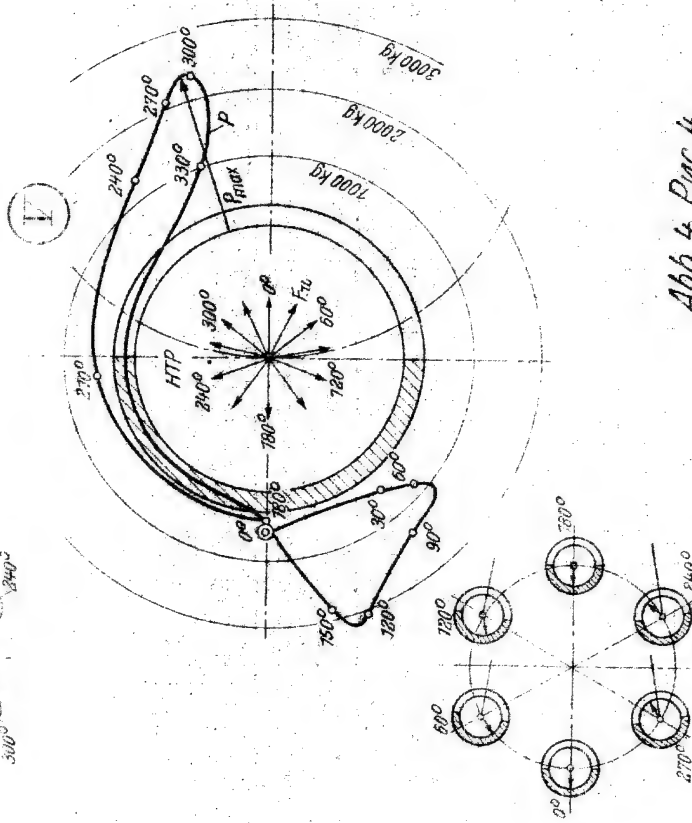
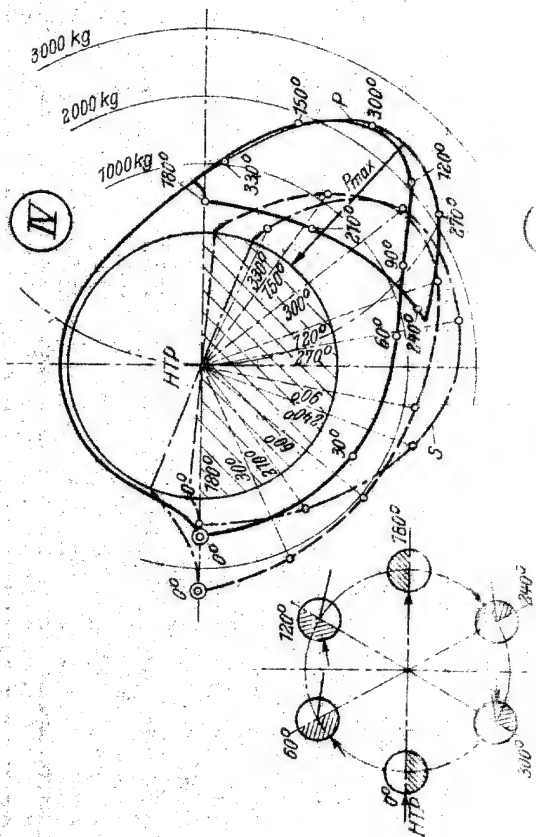
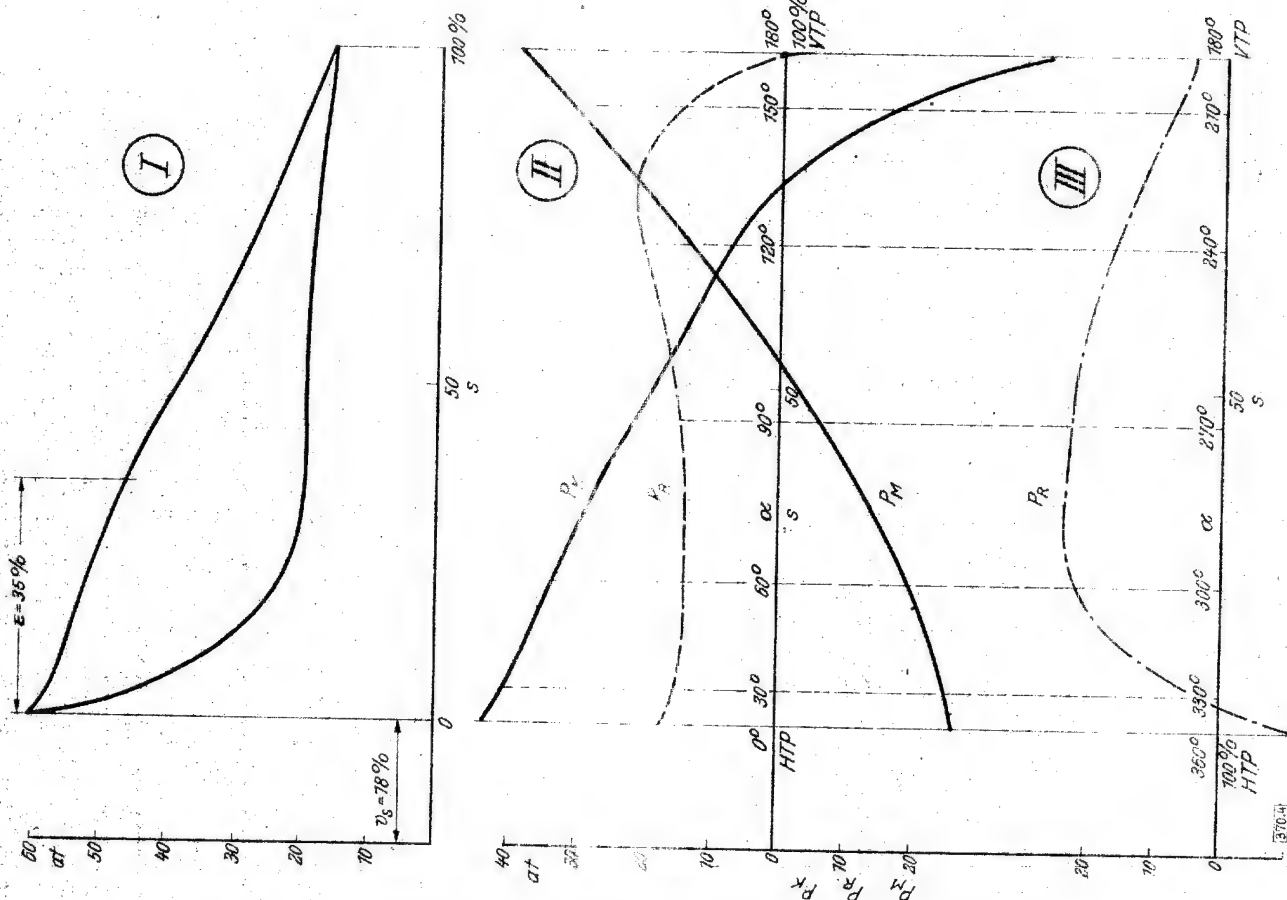


Abb. 4 Pmc. 4

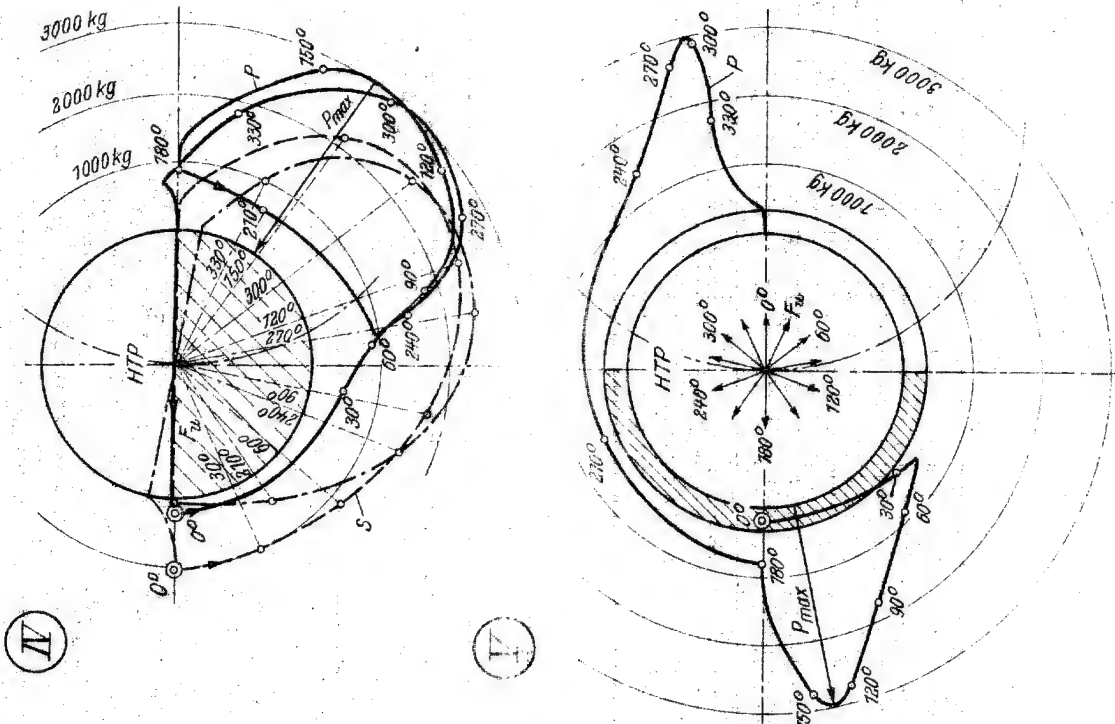
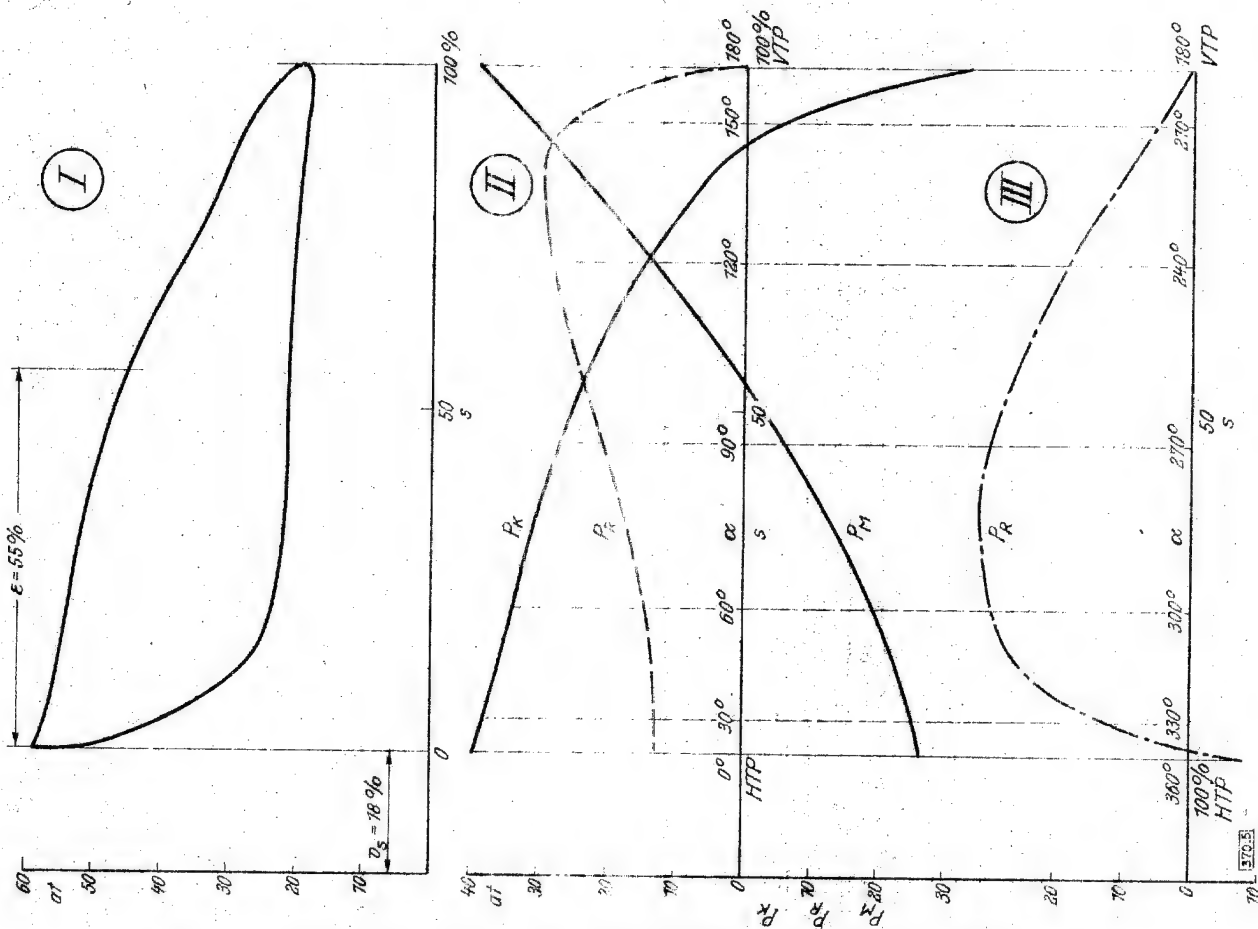


Abb. 5 Рис. 5

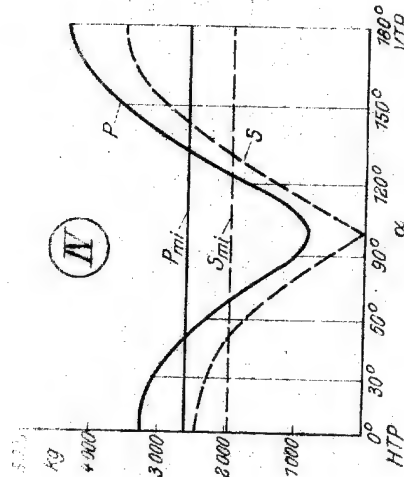
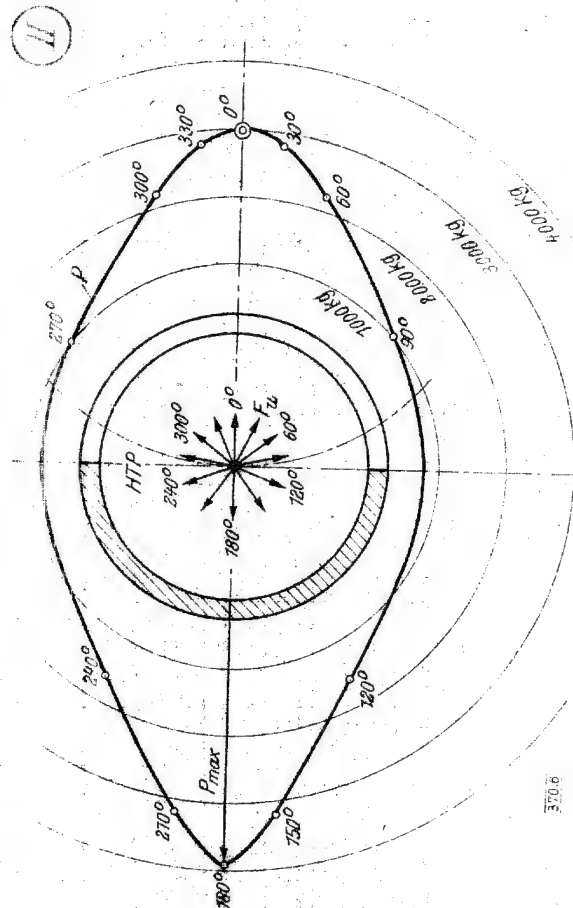
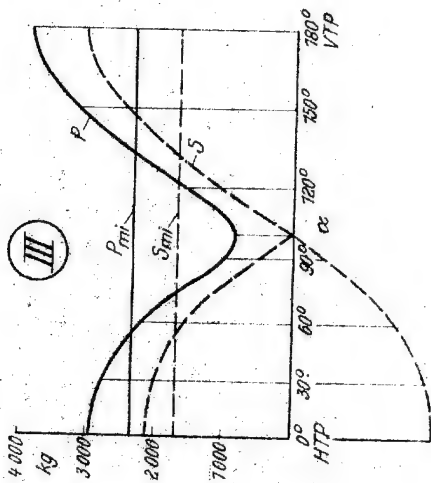


Abb. 6 PNC.6

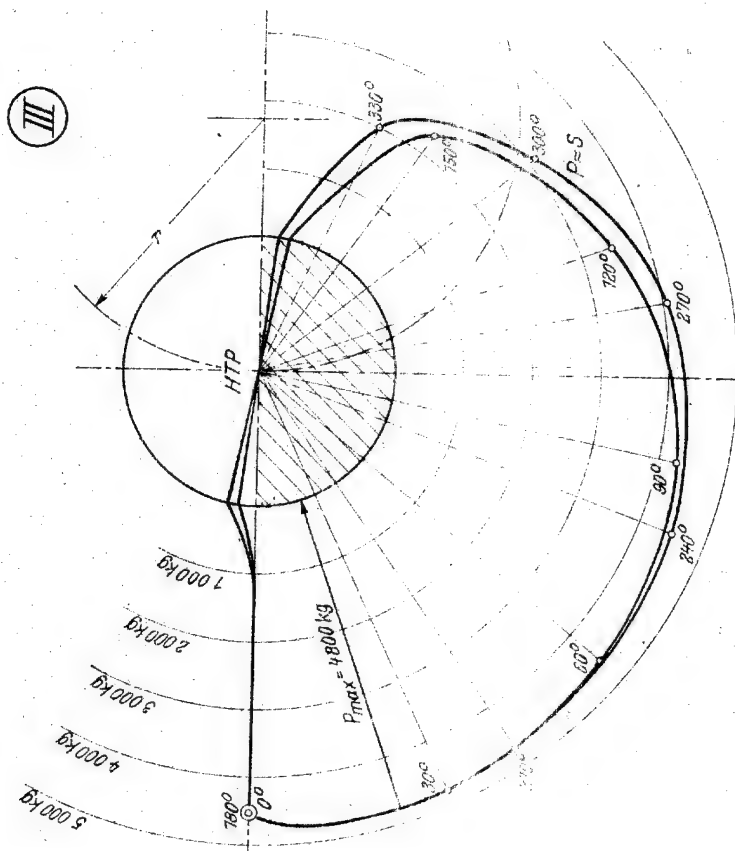
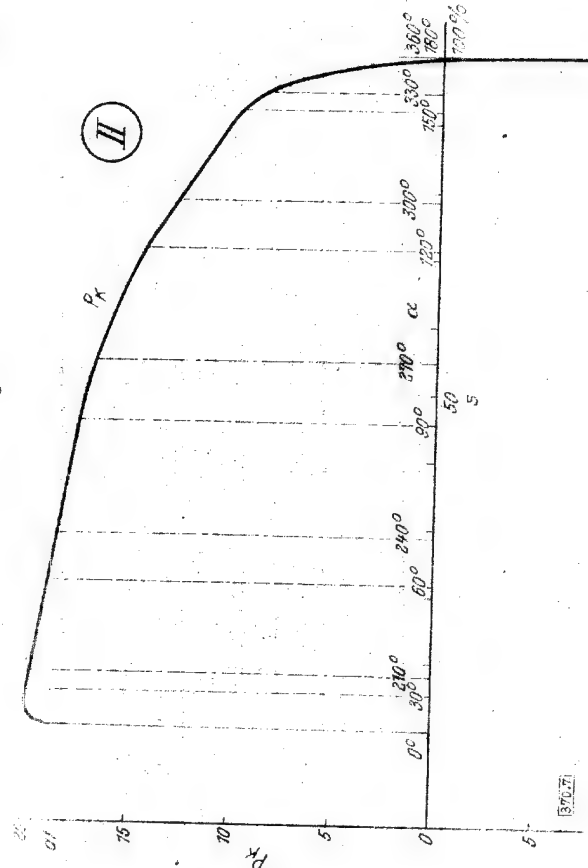
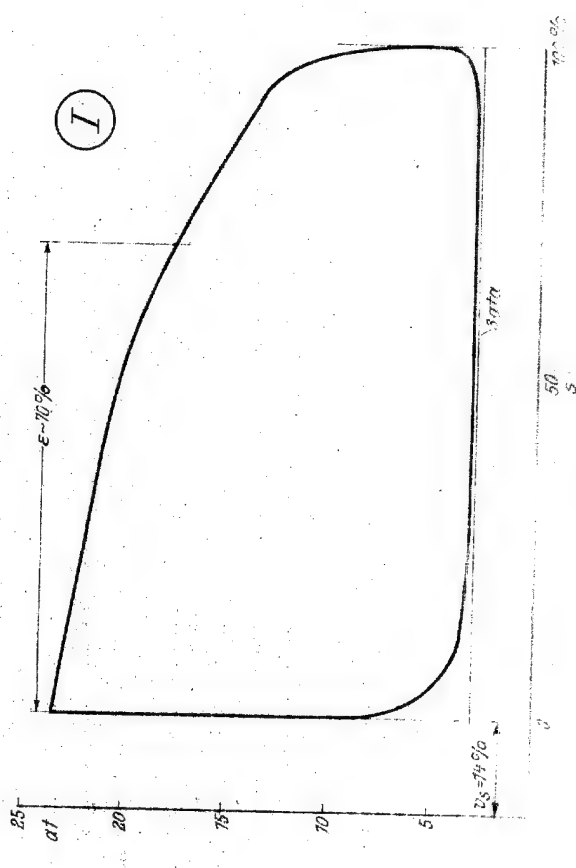


Abb. 7 Pnc. 7

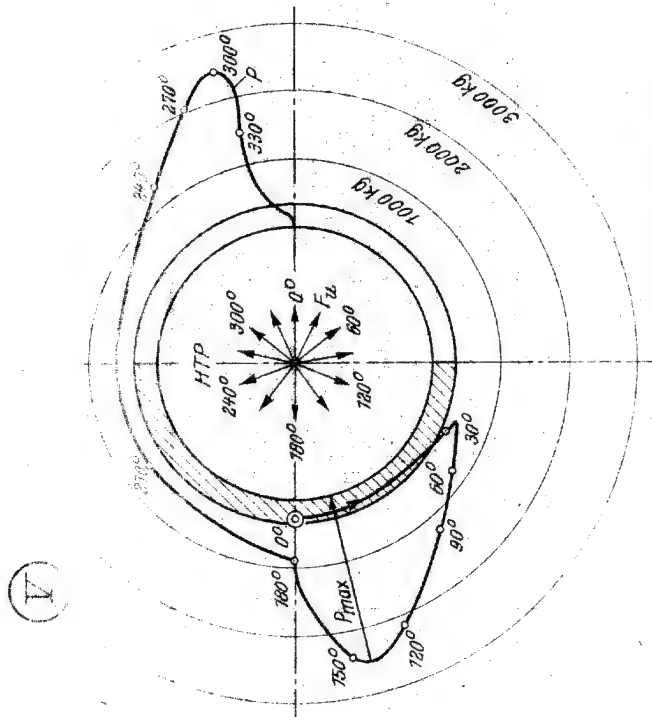
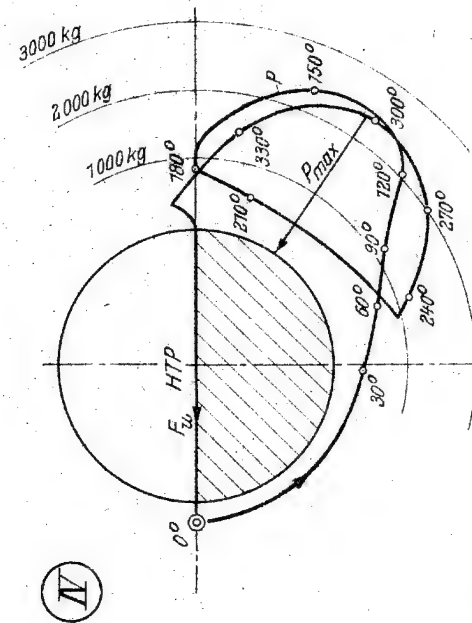
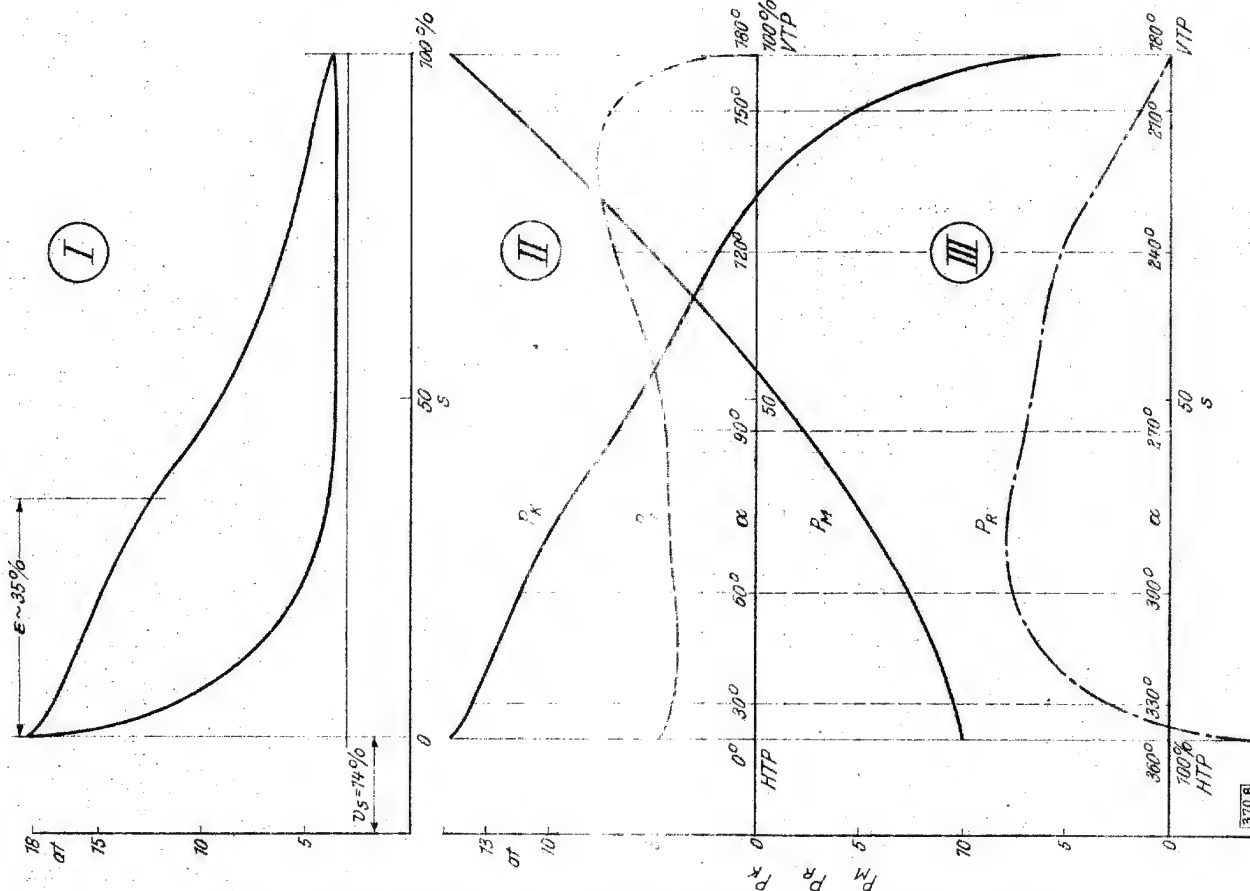


Abb. 8 Pnc. 8



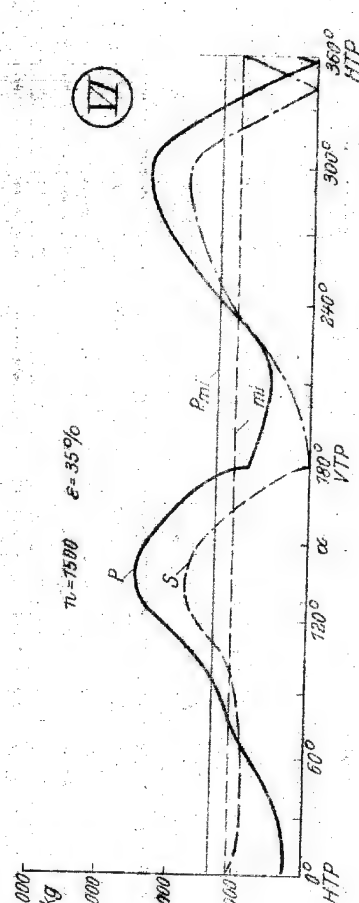
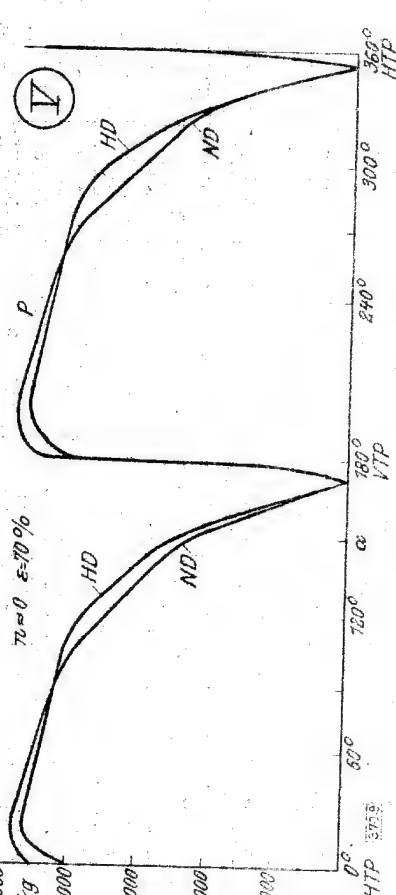
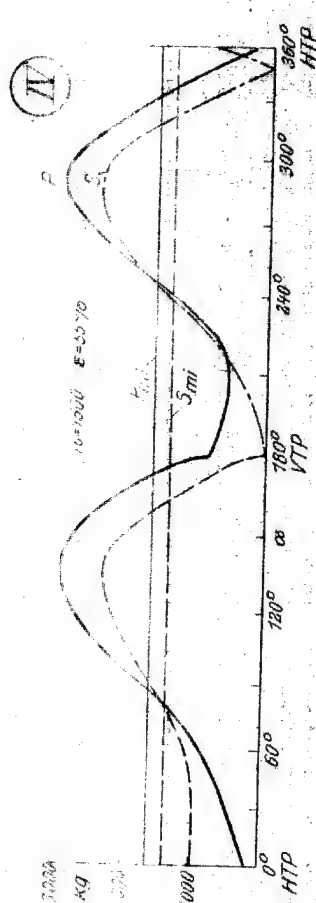
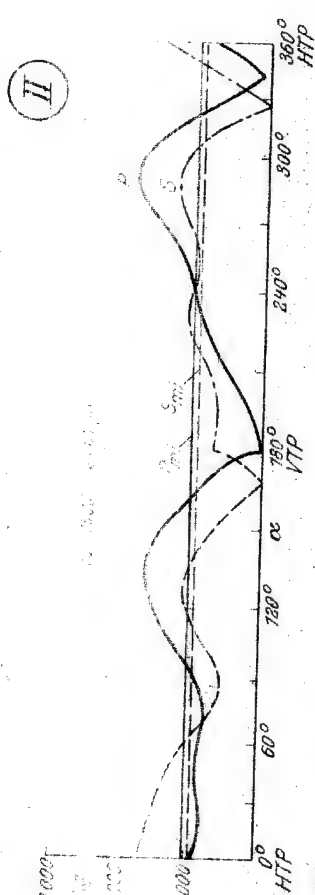
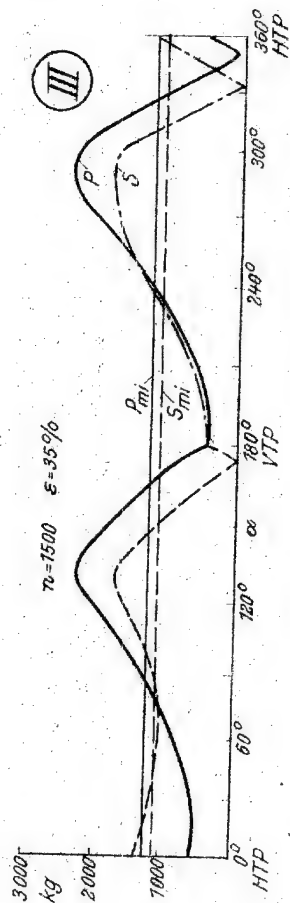
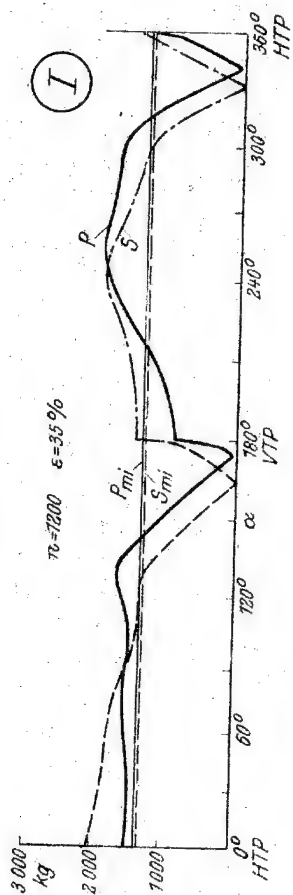


Abb.9 Pnc.9



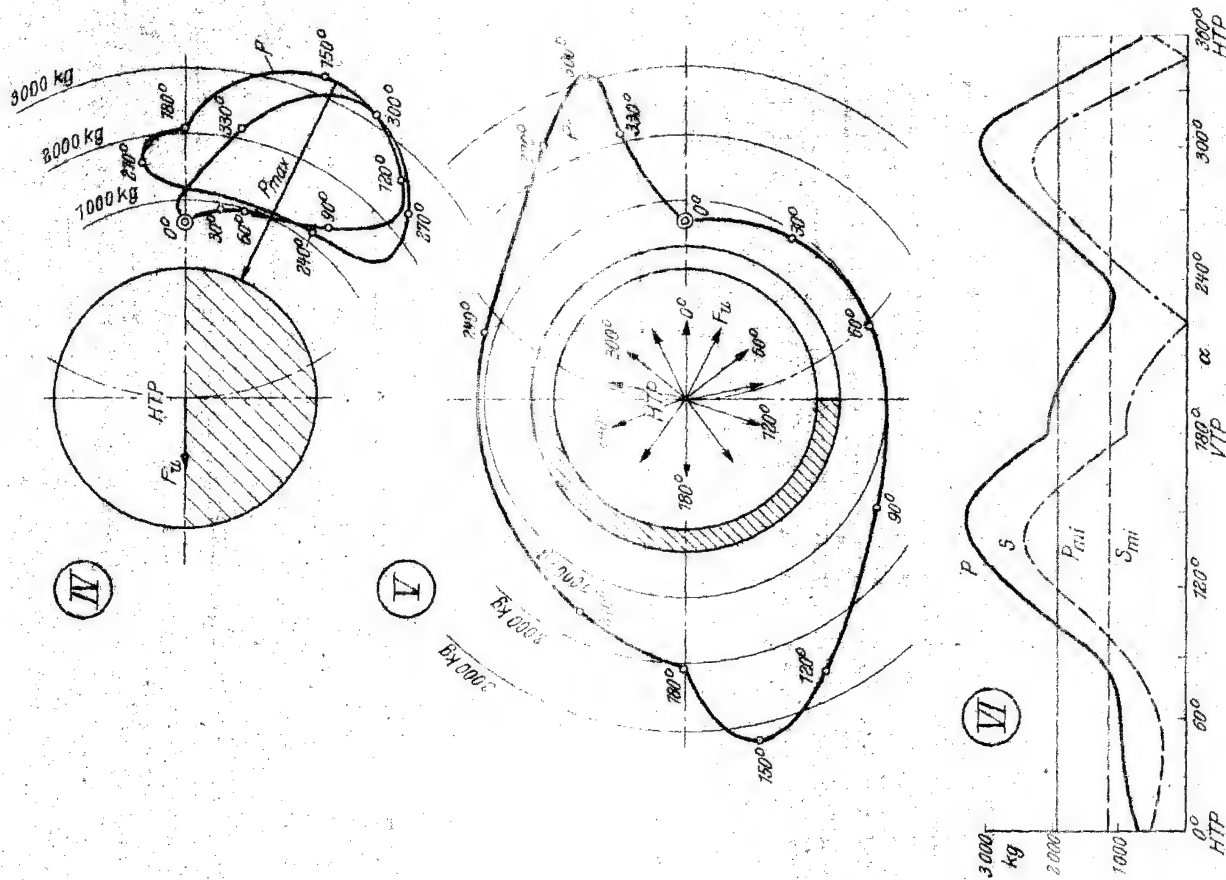
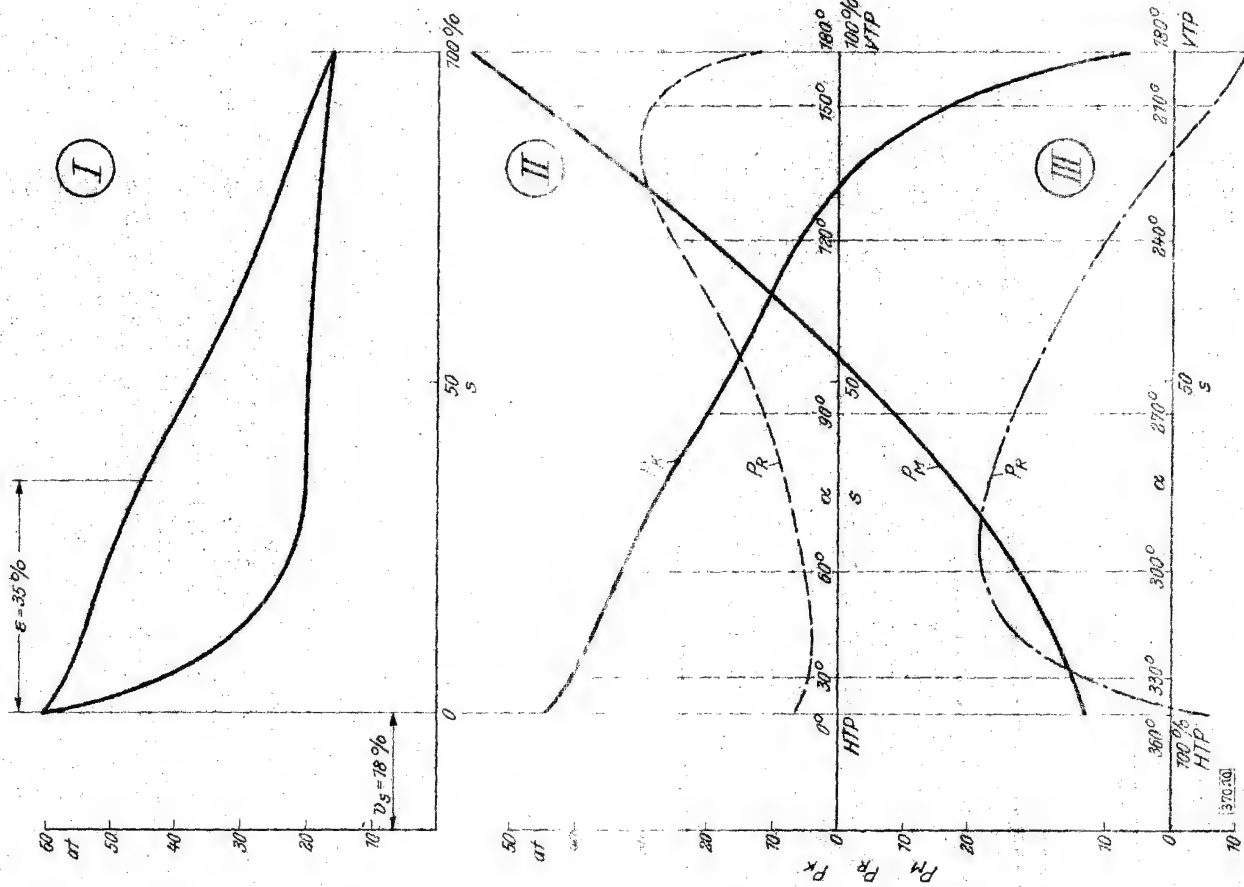


Abb. 10. Pnc. 10

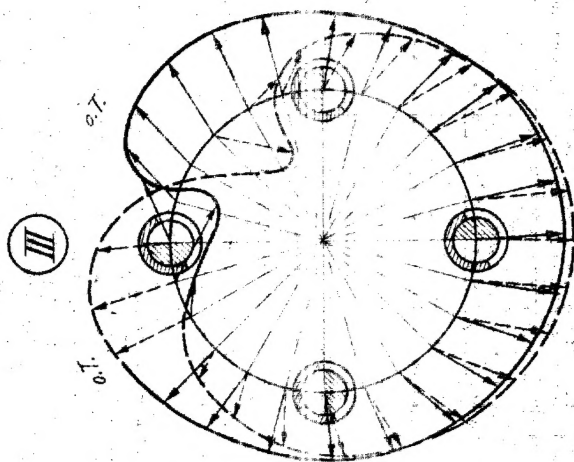
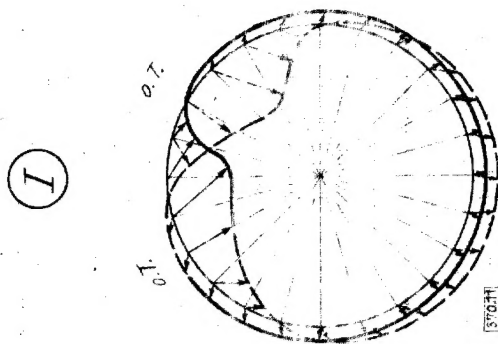
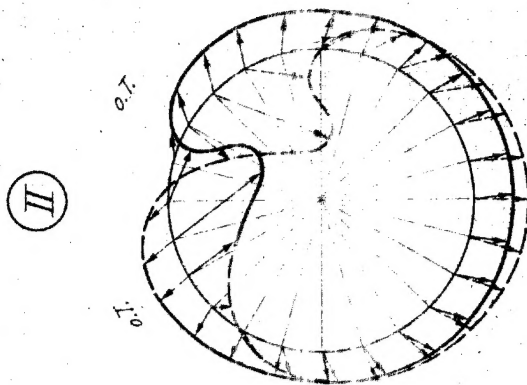


Abb. 77 Рис. 77



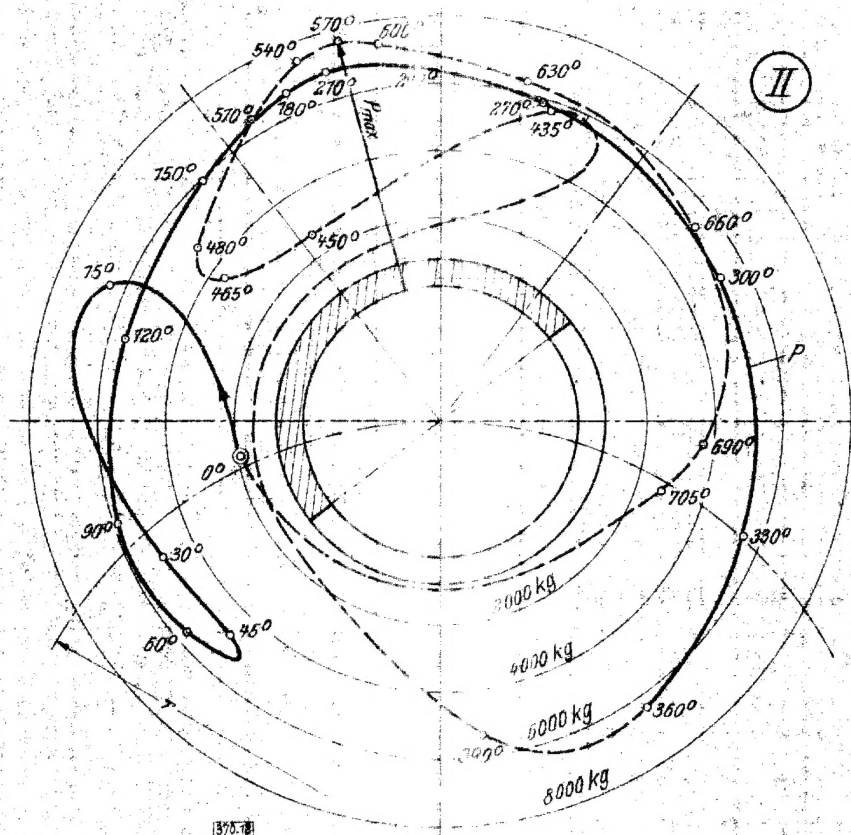
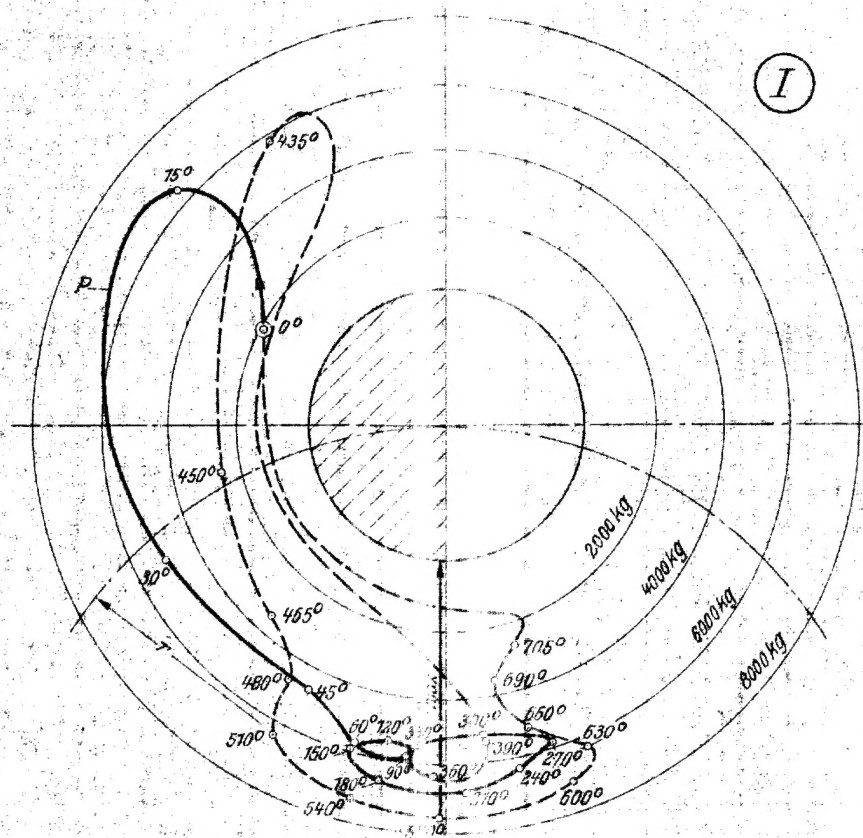


Abb. 12 Рис. 12

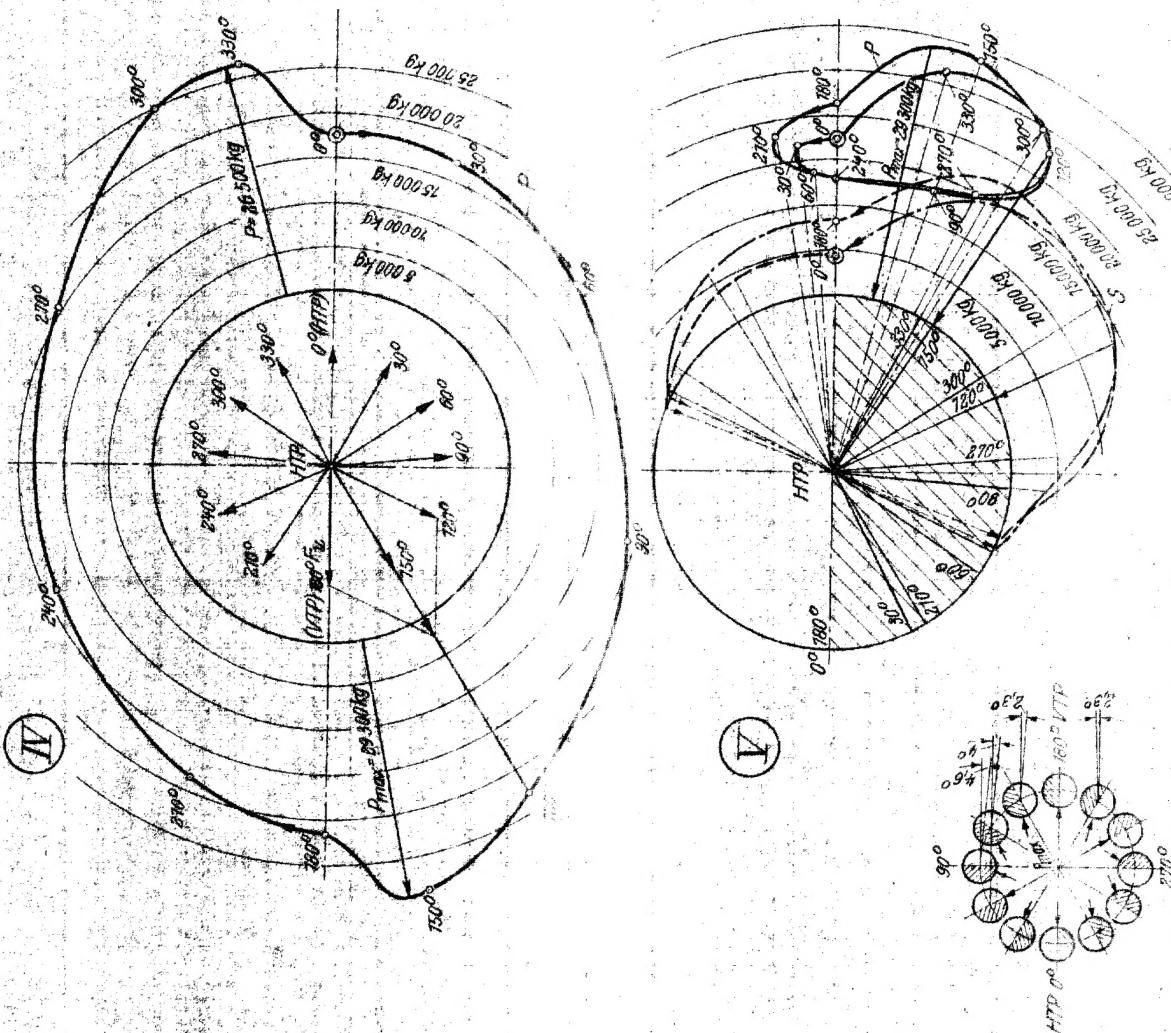
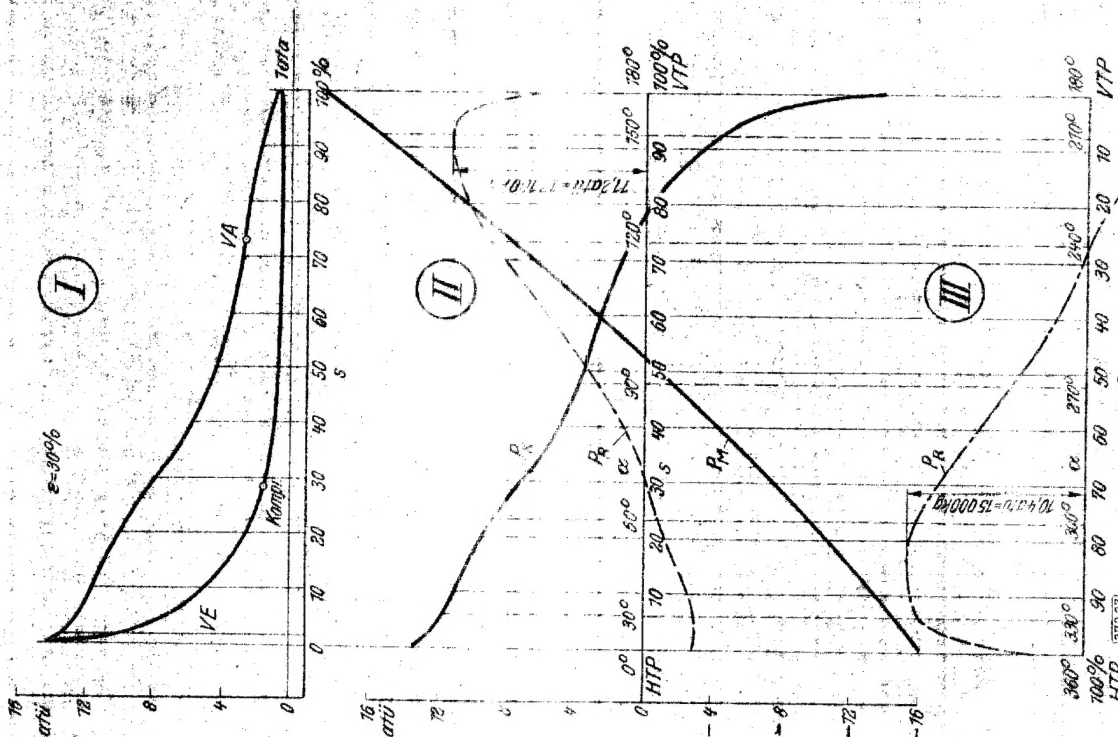


Abb. 13 PNC.13



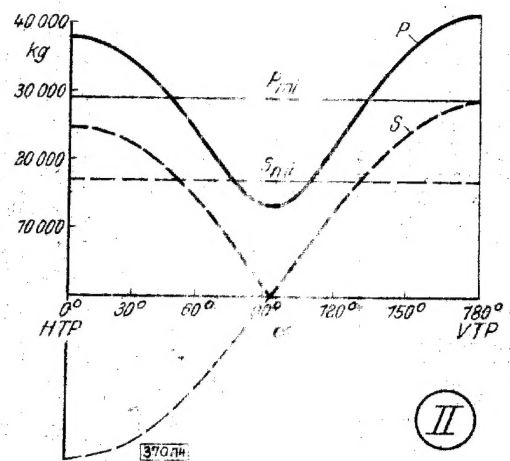
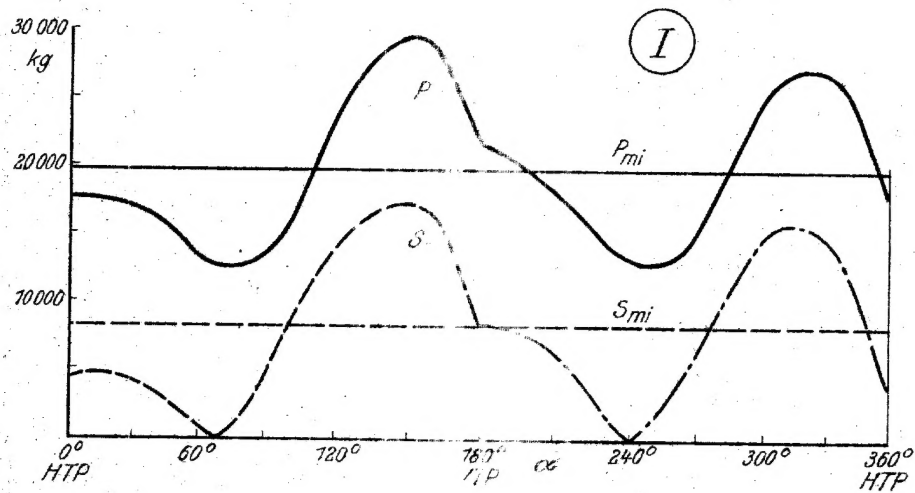


Abb. 14 Рис. 14